

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平9-281536

(43) 公開日 平成9年(1997)10月31日

(51) Int.Cl. ⁴	識別記号	庁内整理番号	F I	技術表示箇所
G 0 2 F 1/37			G 0 2 F 1/37	
G 0 2 B 6/13			G 0 2 B 6/12	M
6/122				A
6/12				H

審査請求 未請求 請求項の数50 O L (全 39 頁)

(21) 出願番号 特願平8-346143

(22) 出願日 平成8年(1996)12月25日

(31) 優先権主張番号 特願平7-343602

(32) 優先日 平7(1995)12月28日

(33) 優先権主張国 日本 (J P)

(31) 優先権主張番号 特願平8-28994

(32) 優先日 平8(1996)2月16日

(33) 優先権主張国 日本 (J P)

(71) 出願人 000005821

松下電器産業株式会社

大阪府門真市大字門真1006番地

(72) 発明者 水内 公典

大阪府門真市大字門真1006番地 松下電器
産業株式会社内

(72) 発明者 山本 和久

大阪府門真市大字門真1006番地 松下電器
産業株式会社内

(72) 発明者 大西 繁喜

大阪府門真市大字門真1006番地 松下電器
産業株式会社内

(74) 代理人 弁理士 山本 秀策

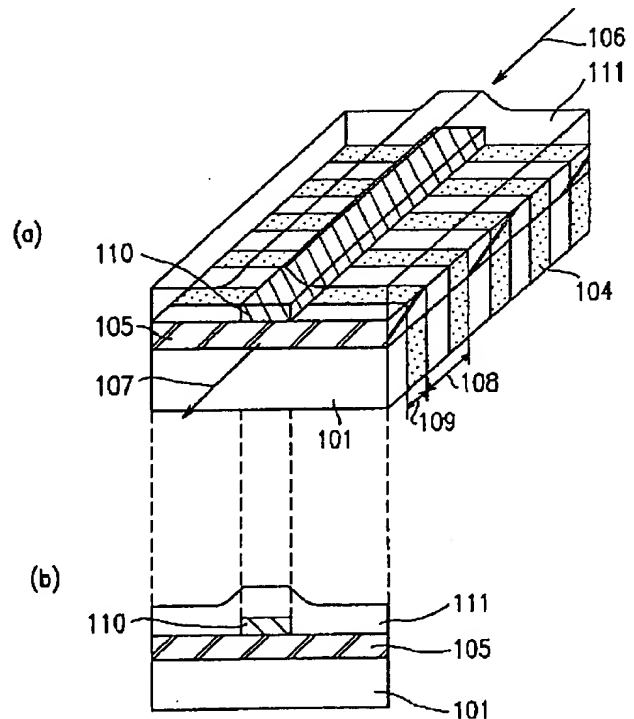
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光導波路及び光波長変換素子とそれらの製造方法、ならびに短波長光発生装置及び光ピックアップ

(57) 【要約】

【課題】 短波長光発生用の光波長変換素子の高効率化及び出力安定化を図る。

【解決手段】 LiTaO_3 基板101の上に形成した分極反転層104、プロトン交換層105、及びクラッド層110を含む光波長変換素子において、クラッド層110を基板101より高い屈折率を有する材料で形成する。これによって、伝搬する基本波106の閉じ込めを強化して、基本波106と第2高調波(第2高調波)107とのオーバーラップを高め、波長の変換効率を大幅に改善する。さらに、光損傷による出力変動も低減されて、高出力且つ安定な光波長変換素子が得られる。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 光学材料と、

該光学材料に形成された光導波層と、

該光導波層の表面に形成されたクラッド層と、を備え、
該光導波層は波長 λ_1 の光及び波長 λ_2 の光($\lambda_1 > \lambda_2$)が導波可能であり、

該クラッド層の屈折率と厚さは、該波長 λ_2 の光に対する導波条件を満足し且つ該波長 λ_1 の光に対してはカットオフ条件を満たすように設定されている、光導波路。

【請求項2】 前記光導波層がストライプ状である、請求項1に記載の光導波路。

【請求項3】 前記光学材料の表面近傍に形成された屈折率 n_1 の高屈折率層をさらに備え、該光学材料が屈折率 n_s を有し、前記光導波層は該光学材料の表面近傍にストライプ状に形成され且つ屈折率 n_f を有しており、該屈折率は $n_f > n_1 > n_s$ の関係を満足している、請求項1に記載の光導波路。

【請求項4】 前記クラッド層がストライプ状である、請求項1に記載の光導波路。

【請求項5】 前記光導波層がストライプ状である、請求項4に記載の光導波路。

【請求項6】 前記光導波層の表面にストライプ状にリッジが形成されており、前記クラッド層は該リッジの上にストライプ状に形成されていて、該光導波層の中の前記光は該リッジを導波する、請求項1に記載の光導波路。

【請求項7】 前記光学材料は円筒状のコアを形成し、前記クラッド層は該コアの周辺部を覆っている、請求項1に記載の光導波路。

【請求項8】 前記光導波路において、前記波長 λ_1 の光は基本モードで伝搬し、前記波長 λ_2 の光は高次モードで伝搬する、請求項1から7のいずれかに記載の光導波路。

【請求項9】 前記クラッド層の実効屈折率 N_c と前記光導波層の実効屈折率 N_f とは $N_c > 1.02 \cdot N_f$ の関係を満足している、請求項1から8のいずれかに記載の光導波路。

【請求項10】 前記クラッド層が多層膜からなっている、請求項1から9のいずれかに記載の光導波路。

【請求項11】 非線形光学効果を有する材料でできた基板と、

該基板に形成された光導波層と、

該光導波層の表面に形成されたクラッド層と、を備え、
該光導波層は波長 λ の基本波及び波長 $\lambda/2$ の第2高調波が導波可能であり、

該クラッド層は、該光導波層内を導波する基本モードの基本波と高次モードの第2高調波との間の電界分布の重なりを高め、該基本波を該第2高調波に変換する、光波長変換素子。

【請求項12】 前記クラッド層の屈折率と厚さは、前

記第2高調波に対する導波条件を満足し且つ前記基本波に対してはカットオフ条件を満たすように設定されている、請求項11に記載の光波長変換素子。

【請求項13】 前記光導波層がストライプ状である、請求項11または12に記載の光波長変換素子。

【請求項14】 前記基板の表面近傍に形成された屈折率 n_1 の高屈折率層をさらに備え、該基板が屈折率 n_s を有し、前記光導波層は該基板の表面近傍にストライプ状に形成され且つ屈折率 n_f を有しており、該屈折率は $n_f > n_1 > n_s$ の関係を満足していて、前記クラッド層の屈折率と厚さは、前記第2高調波に対する導波条件を満足し且つ前記基本波に対してはカットオフ条件を満たすように設定されている、請求項11に記載の光波長変換素子。

【請求項15】 前記クラッド層がストライプ状であり、該クラッド層の屈折率と厚さは、前記第2高調波に対する導波条件を満足し且つ前記基本波に対してはカットオフ条件を満たすように設定されている、請求項11に記載の光波長変換素子。

【請求項16】 前記光導波層がストライプ状である、請求項15に記載の光波長変換素子。

【請求項17】 前記光導波層の表面にストライプ状にリッジが形成されており、前記クラッド層は該リッジの上にストライプ状に形成されていて、該光導波層の中の前記光は該リッジを導波し、該クラッド層の屈折率と厚さは、前記第2高調波に対する導波条件を満足し且つ前記基本波に対してはカットオフ条件を満たすように設定されている、請求項11に記載の光波長変換素子。

【請求項18】 前記光導波層において、前記基本モードの基本波と前記高次モードの第2高調波とがお互いに位相整合している、請求項11から17のいずれかに記載の光波長変換素子。

【請求項19】 前記クラッド層の実効屈折率 N_c と前記光導波層の実効屈折率 N_f とは $N_c > 1.02 \cdot N_f$ の関係を満足している、請求項11から18のいずれかに記載の光波長変換素子。

【請求項20】 前記クラッド層が多層膜からなっている、請求項11から19のいずれかに記載の光波長変換素子。

【請求項21】 前記光導波層を伝搬する前記第2高調波のモードの次数が、前記クラッド層を伝搬可能なモードの次数より1つ大きい、請求項11から20のいずれかに記載の光波長変換素子。

【請求項22】 前記クラッド層が Nb_2O_5 を含んでい、請求項11から21のいずれかに記載の光波長変換素子。

【請求項23】 前記クラッド層が線形材料からなる、請求項11から21のいずれかに記載の光波長変換素子。

【請求項24】 前記基板が $\text{LiNb}_{1-x}\text{Ta}_x\text{O}_3$ ($0 \leq x \leq 1$)



で、該基板内に周期状の分極反転構造が形成されている、請求項11から23のいずれかに記載の光波長変換素子。

【請求項25】 半導体レーザと、光波長変換素子と、を備え、該半導体レーザから出射された光の波長が該光波長変換素子により変換される短波長光発生装置であって、該光波長変換素子が請求項11から24のいずれかに記載のものである、短波長光発生装置。

【請求項26】 短波長光発生装置と、集光光学系と、を備え、該短波長光発生装置から出射される短波長光が該集光光学系により集光される光ピックアップであって、該短波長光発生装置が請求項25に記載のものである、光ピックアップ。

【請求項27】 非線形光学物質からなる基板の表面近傍に第1のイオン交換層を形成する工程と、該第1のイオン交換層をアニール処理してアニール処理イオン交換層を形成する工程と、該アニール処理イオン交換層の所定の位置に第2のイオン交換層を形成する工程と、該第2のイオン交換層の上方に所定のパターンを有するレジストマスクを形成する工程と、該レジストマスクを使用して該第2のイオン交換層の非マスク部分をエッチングで除去し、リッジを形成する工程と、を包含する、光導波路の製造方法。

【請求項28】 前記第2のイオン交換層の形成工程は、前記アニール処理イオン交換層の表面に直線状の金属マスクを形成する工程と、該アニール処理イオン交換層のうち該金属マスクに覆われていない部分に前記第2のイオン交換層を形成する工程と、を含み、前記レジストマスクは、該金属マスクの上のみに選択的に形成される、請求項27に記載の光導波路の製造方法。

【請求項29】 前記レジストパターンは、裏面露光を利用して前記金属マスクの上のみに選択的に形成される、請求項28に記載の光導波路の製造方法。

【請求項30】 前記第2のイオン交換層の形成工程は、前記アニール処理イオン交換層の表面近傍に前記第2のイオン交換層を形成する工程を含み、前記レジストマスクは、該第2のイオン交換層の表面に直線状に形成される、請求項27に記載の光導波路の製造方法。

【請求項31】 前記リッジの表面に誘電体膜を形成する工程をさらに包含する、請求項27から30のいずれかに記載の光導波路の製造方法。

【請求項32】 前記基板がC板の $\text{LiNb}_{1-x}\text{Ta}_x\text{O}_3$ ($0 \leq x \leq 1$) 基板である、請求項27から31のいずれかに記載の光導波路の製造方法。

【請求項33】 前記第1のイオン交換層及び前記第2のイオン交換層がいずれもプロトン交換層である、請求

項27から32のいずれかに記載の光導波路の製造方法。

【請求項34】 非線形光学物質からなる基板の表面近傍に第1のイオン交換層を形成する工程と、該第1のイオン交換層をアニール処理してアニール処理イオン交換層を形成する工程と、該基板内に分極反転層を形成する工程と、該アニール処理イオン交換層の所定の位置に第2のイオン交換層を形成する工程と、該第2のイオン交換層の上方に所定のパターンを有するレジストマスクを形成する工程と、該レジストマスクを使用して該第2のイオン交換層の非マスク部分をエッチングで除去し、リッジを形成する工程と、を包含する、光波長変換素子の製造方法。

【請求項35】 前記第2のイオン交換層の形成工程は、前記アニール処理イオン交換層の表面に直線状の金属マスクを形成する工程と、該前記アニール処理イオン交換層のうち該金属マスクに覆われていない部分に前記第2のイオン交換層を形成する工程と、を含み、前記レジストマスクは、該金属マスクの上のみに選択的に形成される、請求項34に記載の光波長変換素子の製造方法。

【請求項36】 前記レジストパターンは、裏面露光を利用して前記金属マスクの上のみに選択的に形成される、請求項35に記載の光波長変換素子の製造方法。

【請求項37】 前記第2のイオン交換層の形成工程は、前記アニール処理イオン交換層の表面近傍に前記第2のイオン交換層を形成する工程を含み、前記レジストマスクは、該第2のイオン交換層の表面に直線状に形成される、請求項34に記載の光波長変換素子の製造方法。

【請求項38】 前記リッジの表面に誘電体膜を形成する工程をさらに包含する、請求項34から37のいずれかに記載の光波長変換素子の製造方法。

【請求項39】 前記基板がC板の $\text{LiNb}_{1-x}\text{Ta}_x\text{O}_3$ ($0 \leq x \leq 1$) 基板である、請求項34から38のいずれかに記載の光波長変換素子の製造方法。

【請求項40】 前記第1のイオン交換層及び前記第2のイオン交換層がいずれもプロトン交換層である、請求項34から39のいずれかに記載の光波長変換素子の製造方法。

【請求項41】 非線形光学物質からなる基板と、該基板の表面近傍に形成された、光導波領域を含む第1のイオン交換層と、該光導波領域の近傍に形成された、該第1のイオン交換層のイオン交換濃度より高いイオン交換濃度を有する第2のイオン交換層と、を備える、光導波路。

【請求項42】 前記第1のイオン交換層が導波方向と実質的に平行な直線状のリッジを有し、該リッジが前記



光導波領域を含み、前記第2のイオン交換層は該リッジの側面に形成されている、請求項41に記載の光導波路。

【請求項43】 前記第2のイオン交換層は、前記第1のイオン交換層の表面に、導波方向と実質的に平行な直線状のリッジを形成している、請求項41に記載の光導波路。

【請求項44】 前記基板がC板の $\text{LiNb}_{1-x}\text{Ta}_x\text{O}_3$ ($0 \leq x \leq 1$) 基板である、請求項41から43のいずれかに記載の光導波路。

【請求項45】 前記第1のイオン交換層及び前記第2のイオン交換層がいずれもプロトン交換層である、請求項41から44のいずれかに記載の光導波路。

【請求項46】 非線形光学物質からなる基板と、該基板内に一定周期で形成された分極反転層と、該基板の表面近傍に形成された、光導波領域を含む第1のイオン交換層と、該光導波領域の近傍に形成された、該第1のイオン交換層のイオン交換濃度より高いイオン交換濃度を有する第2のイオン交換層と、を備える、光波長変換素子。

【請求項47】 前記第1のイオン交換層が導波方向と実質的に平行な直線状のリッジを有し、該リッジが前記光導波領域を含み、前記第2のイオン交換層は該リッジの側面に形成されている、請求項46に記載の光波長変換素子。

【請求項48】 前記第2のイオン交換層は、前記第1のイオン交換層の表面に導波方向と実質的に平行な直線状のリッジを形成している、請求項46に記載の光波長変換素子。

【請求項49】 前記基板がC板の $\text{LiNb}_{1-x}\text{Ta}_x\text{O}_3$ ($0 \leq x \leq 1$) 基板である、請求項46から48のいずれかに記載の光波長変換素子。

【請求項50】 前記第1のイオン交換層及び前記第2のイオン交換層がいずれもプロトン交換層である、請求項46から49のいずれかに記載の光波長変換素子。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、コヒーレント光源を応用した光情報処理或いは光応用計測に使用される光導波路、及びそれを使用した光波長変換素子、ならびにそれらの製造方法に関する。さらに、上記のような光導波路或いは光波長変換素子を用いて構成される短波長光発生装置、及びそれを用いた光ピックアップに関する。

【0002】

【従来の技術】光導波路は、光波制御技術として、通信、光情報処理、計測などの広い分野で応用されている。中でも、光導波路を光波長変換素子に適用すれば、半導体レーザから出射されるレーザ光（基本波）の波長をそのような光波長変換素子で変換し、より短波長の光（第2高調波）を得ることができる小型の短波長光源が

実現されるので、盛んに研究が行われている。

【0003】従来の光導波路としては、埋め込み型光導波路が一般に用いられている。図1(a)～(d)は、プロトンイオン(+H)の交換を行うプロトン交換処理と熱処理とによって埋め込み型光導波路を製造する、従来技術による方法を説明する断面図である。

【0004】具体的には、まず図1(a)に示すように、 LiTaO_3 基板11の表面(+C面)に、直線状の開口部を有するTa層12を形成する。Ta層12は、 LiTaO_3 基板11の表面を、所定の領域を除いてマスクする。

【0005】次に、Ta層12でマスクされた LiTaO_3 基板11を、約220℃～約300℃のピロリン酸で処理して、図1(b)に示すように、マスクされていない LiTaO_3 基板11の表面近傍にプロトン交換処理された領域13（以下では、「プロトン交換領域」とも称する）を形成する。

【0006】続いて、Ta層12をフッ酸と硝酸とを1:2で混合した溶液に数秒間浸して、図1(c)に示すようにTa層12を除去する。

【0007】その後、 LiTaO_3 基板11をアニール処理して、図1(d)に示すように、アニール処理されたプロトン交換層14を形成する。このようにして形成されたアニール処理されたプロトン交換層14が、埋め込み型光導波路として機能する。

【0008】一方、光の閉じ込めを強化するためにリッジ型の光導波路構造を採用した光波長変換素子が、例えば特開平1-238631号公報に開示されている。

【0009】図2(a)に示すのはそのようなリッジ型光導波路22を含む従来の光波長変換素子の構成の一例であり、 LiNbO_3 基板21の上に形成された光導波路22の表面がリッジ状に加工されている。すなわち、図2

(a)の線2B-2Bに沿った断面図である図2(b)に示すように、光が導波する部分（すなわち、リッジ部）22aの厚さdが、側部22bの厚さhよりも大きくなっている。光導波路22にリッジを設け、そこを光の導波部分22aとして機能させることにより、光の横方向の閉じ込めが強まって導波路22の内部での基本波のパワー密度が向上され、基本波から第2高調波への変換効率の向上を実現している。

【0010】さらに、図2(a)の光波長変換素子の構成では、光導波路22の厚さが、基本波P1が入射する端面24の近傍でその他の部分よりも厚くなっていて、 LiNbO_3 基板21への入射部23を構成している。図2

(a)の線2C-2Cに沿った断面図である図2(c)に示すように、端面24から入射部23を通して LiNbO_3 基板21に入射した基本波P1は、波長が変換されて第2高調波P2となった後に、出射部25から LiNbO_3 基板21の外へ出ていく。

【0011】さらに、例えば特開昭61-94031号公報には、装荷型光導波路を用いた光波長変換素子が開

示されている。このような光波長変換素子の構成の一例を、図3に示す。

【0012】具体的には、 LiNbO_3 基板31の上にプロトン交換によって光導波路32が形成され、さらにその上には、光導波路32より低い屈折率を有する SiO_2 によって、ストライプ状のクラッド層（装荷層）33が形成されている。このような構成を有する装荷型光導波路により、低損失の導波路の形成が可能となつて、基本波P1を高効率で第2高調波P2に変換する光波長変換素子を実現される。

【0013】また、 LiNbO_3 基板にリッジ型導波路を形成する以下のような方法が、すでに報告されている。

【0014】 LiNbO_3 は機械的及び化学的に安定な材料であつてエッチングされ難いために、レジストとのエッチング選択比が小さい。そのため、 LiNbO_3 の表面に深いエッチング形状を作製することは、一般に困難である。しかし、プロトン交換処理された LiNbO_3 では、エッチング速度が、未処理の基板の数倍に速まる。この現象を利用して、以下のようなリッジ型光導波路の製造方法が提案されている。すなわち、C板の LiNbO_3 基板を適切な酸の中で熱処理して、その表面にプロトン交換層を形成する。さらに、形成されたプロトン交換層の上にフォトリソグラフィ法でストライプ状のTi保護マスク層を形成し、ECRエッチングにより非マスク部分をエッチングする。その後、Ti保護マスク層を除去し、光導波路の両端面を光学研磨して、入出射部を形成する。

【0015】一方、図4は、埋め込み型光導波路を用いた光波長変換素子の他の構成を示す。すなわち、 LiNbO_3 基板41の上にプロトン交換光導波路42が形成され、さらにその上には、光導波路42より高い屈折率を有する TiO_2 によってクラッド層（装荷層）43が形成されている。また、光導波路42に周期的に直交するように、複数の分極反転層44が形成されている。このような構成の入射部45から入射した基本波P1は、光導波路42を伝搬しながら分極反転層44とオーバーラップして第2高調波P2に変換され、出射部46から外に出てくる。

【0016】図5(a)及び(b)は、クラッド層（装荷層）43がない構成とある構成とにおける、光導波路42の導波モードと分極反転層44とのオーバーラップを模式的に示す図である。図5(a)及び(b)のそれぞれにおいて、図の左側には光波長変換素子の断面構造を示し、図の右側には、導波路断面の深さ方向の伝搬光の電界分布を表す。

【0017】図5(a)に示すクラッド層を有さない構成では、分極反転層44とオーバーラップして高調波に変換されるのは伝搬光（基本波P1）の約半分（図5

(a)の右側に示された電界分布におけるハッチングされた領域）に過ぎず、得られる高調波出力はあまり大きくない。一方、図5(b)に示すように光導波路42の

上に屈折率が大きいクラッド層43を有する構成では、伝搬光（基本波P1）の大部分（図5(b)の右側に示された電界分布におけるハッチングされた領域）が分極反転層44にオーバーラップするので、基本波P1を高効率で第2高調波P2に変換する光波長変換素子可以实现される。

【0018】

【発明が解決しようとする課題】光導波路を光波長変換素子に適用する際には、導波モード（基本波及び第2高調波）間のオーバーラップが、高効率の光波長変換素子を実現するための重要な要素である。すなわち、基本波の電界分布と第2高調波と電界分布とのオーバーラップが大きいほど、光波長変換素子の変換効率が大きくなる。高効率の光波長変換素子を実現するために基本波の電界分布と第2高調波と電界分布とのオーバーラップを大きくするには、例えば、光導波路の屈折率分布をステップ状にすることが考えられる。

【0019】しかし、上記のようにプロトン交換処理と熱処理とによって埋め込み型光導波路を製造する従来技術の方法では、形成される光導波路の屈折率分布が、プロトンの熱拡散状態に依存して、表面近傍の屈折率が高く深さ方向に向かって次第に低くなるグレーディッド状となる。このような屈折率分布状態の下では、導波する基本波と第2高調波との間で電界分布が大きく異なり、高効率の光波長変換素子の実現が困難である。また、この従来方法では、光導波路の屈折率分布を自由に制御できない。

【0020】また、従来の埋め込み型光導波路では、導波路の周辺部への漏れ光によって光損傷が発生しやすく、高いパワー密度を有する光を導波させて高出力の第2高調波を発生させることが難しい。

【0021】一方、光導波路の上にクラッド層が形成されている構成では、光導波路の閉じ込めを強化して高効率化を図っている。すなわち、光導波路を伝搬する導波光のモード分布（基本モード）を、クラッド層によって表面近傍に移動させて、分極反転部分と基本モードの基本波或いは基本モードの第2高調波とのオーバーラップを、向上させようとしている。

【0022】しかし、従来の構成では、分極反転部と導波モードとの間のオーバーラップの増大は図れるが、変換効率への影響が最も大きい基本波と第2高調波との間のオーバーラップの増大が図れないために、変換効率の向上に限界がある。これは、基本波と第2高調波とは、波長の違いより光導波路内での導波モードの分布が互いに大きく異なるため、両モード間のオーバーラップの増大に制限があるためである。

【0023】さらに、基本波と第2高調波とがオーバーラップしない部分が大きいために、光損傷の発生による第2高調波出力の不安定性が生じ得る。

【0024】一方、リッジ型光導波路を用いる従来の光

波長変換素子では、光導波路の閉じ込め効果によるパワー密度の増大により、変換効率の向上を達成している。しかし、基本波に対するリッジ導波路による閉じ込め効果の増大は横方向に限られていて、深さ方向の閉じ込めは向上しない。これより、変換効率への影響が最も大きい基本波と第2高調波との間のオーバーラップ（特に深さ方向のオーバーラップ）の増大がリッジ構造では達成できず、変換効率の向上に限界がある。

【0025】本発明は、上記の課題を解決するためになされたものであり、その目的は、（1）屈折率分布の制御が可能であって、基本波と第2高調波とのオーバーラップを大きくすることができるとともに、耐光損傷性に優れた導波構造を有する光導波路を提供すること、

（2）上記のような光導波路を利用して、高出力の第2高調波出力を安定して高効率に供給できる光導波路を提供すること、（3）そのような光導波路及び光波長変換素子の製造方法を提供すること、及び、（4）前述の光導波路や光波長変換素子を用いて形成される短波長光発生装置や光ピックアップを提供すること、である。

【0026】

【課題を解決するための手段】本発明の光導波路は、光学材料と、該光学材料に形成された光導波層と、該光導波層の表面に形成されたクラッド層と、を備え、該光導波層は波長 λ_1 の光及び波長 λ_2 の光（ $\lambda_1 > \lambda_2$ ）が導波可能であり、該クラッド層の屈折率と厚さは、該波長 λ_2 の光に対する導波条件を満足し且つ該波長 λ_1 の光に対してはカットオフ条件を満たすように設定されていて、そのことによって上記目的が達成される。

【0027】ある実施形態では、前記光導波層がストライプ状である。

【0028】ある実施形態では、前記光学材料の表面近傍に形成された屈折率 n_1 の高屈折率層をさらに備え、該光学材料が屈折率 n_s を有し、前記光導波層は該光学材料の表面近傍にストライプ状に形成され且つ屈折率 n_f を有しており、該屈折率は $n_f > n_1 > n_s$ の関係を満足している。

【0029】ある実施形態では、前記クラッド層がストライプ状である。さらに、前記光導波層がストライプ状であってもよい。

【0030】ある実施形態では、前記光導波層の表面にストライプ状にリッジが形成されており、前記クラッド層は該リッジの上にストライプ状に形成されていて、該光導波層の中の前記光は該リッジを導波する。

【0031】ある実施形態では、前記光学材料は円筒状のコアを形成し、前記クラッド層は該コアの周辺部を覆っている。

【0032】好ましくは、前記光導波路において、前記波長 λ_1 の光は基本モードで伝搬し、前記波長 λ_2 の光は高次モードで伝搬する。

【0033】好ましくは、前記クラッド層の実効屈折率

N_c と前記光導波層の実効屈折率 N_f とは $N_c > 1.02 \cdot N_f$ の関係を満足している。

【0034】前記クラッド層が多層膜からなっているてもよい。

【0035】本発明の光波長変換素子は、非線形光学効果を有する材料でできた基板と、該基板に形成された光導波層と、該光導波層の表面に形成されたクラッド層と、を備え、該光導波層は波長 λ の基本波及び波長 $\lambda/2$ の第2高調波が導波可能であり、該クラッド層は、該光導波層内を導波する基本モードの基本波と高次モードの第2高調波との間の電界分布の重なりを高めて、該基本波を該第2高調波に変換し、そのことによって上記目的が達成される。

【0036】好ましくは、前記クラッド層の屈折率と厚さは、前記第2高調波に対する導波条件を満足し且つ前記基本波に対してはカットオフ条件を満たすように設定されている。

【0037】ある実施形態では、前記光導波層がストライプ状である。

【0038】ある実施形態では、前記基板の表面近傍に形成された屈折率 n_1 の高屈折率層をさらに備え、該基板が屈折率 n_s を有し、前記光導波層は該基板の表面近傍にストライプ状に形成され且つ屈折率 n_f を有しており、該屈折率は $n_f > n_1 > n_s$ の関係を満足していて、前記クラッド層の屈折率と厚さは、前記第2高調波に対する導波条件を満足し且つ前記基本波に対してはカットオフ条件を満たすように設定されている。

【0039】ある実施形態では、前記クラッド層がストライプ状であり、該クラッド層の屈折率と厚さは、前記第2高調波に対する導波条件を満足し且つ前記基本波に対してはカットオフ条件を満たすように設定されている。好ましくは、前記光導波層がストライプ状である。

【0040】ある実施形態では、前記光導波層の表面にストライプ状にリッジが形成されており、前記クラッド層は該リッジの上にストライプ状に形成されていて、該光導波層の中の前記光は該リッジを導波し、該クラッド層の屈折率と厚さは、前記第2高調波に対する導波条件を満足し且つ前記基本波に対してはカットオフ条件を満たすように設定されている。

【0041】好ましくは、前記光導波層において、前記基本モードの基本波と前記高次モードの第2高調波とがお互いに位相整合している。

【0042】好ましくは、前記クラッド層の実効屈折率 N_c と前記光導波層の実効屈折率 N_f とは $N_c > 1.02 \cdot N_f$ の関係を満足している。

【0043】前記クラッド層が多層膜からなっているてもよい。

【0044】前記光導波層を伝搬する前記第2高調波のモードの次数は、前記クラッド層を伝搬可能なモードの次数より1つ大きくあり得る。



【0045】前記クラッド層が Nb_2O_5 を含んでいてもよい。或いは、前記クラッド層が線形材料からなっているもよい。

【0046】好ましくは、前記基板が $\text{LiNb}_{1-x}\text{Ta}_x\text{O}_3$ ($0 \leq x \leq 1$)で、該基板内に周期状の分極反転構造が形成されている。

【0047】本発明の短波長光発生装置は、半導体レーザと、光波長変換素子と、を備え、該半導体レーザから出射された光の波長が該光波長変換素子により変換され、該光波長変換素子が上記の特徴を有しており、そのことによって上記目的が達成される。

【0048】本発明の光ピックアップは、短波長光発生装置と、集光光学系と、を備え、該短波長光発生装置から出射される短波長光が該集光光学系により集光され、該短波長光発生装置が上記の特徴を有しており、そのことによって上記目的が達成される。

【0049】本発明の光導波路の製造方法は、非線形光学物質からなる基板の表面近傍に第1のイオン交換層を形成する工程と、該第1のイオン交換層をアニール処理してアニール処理イオン交換層を形成する工程と、該アニール処理イオン交換層の所定の位置に第2のイオン交換層を形成する工程と、該第2のイオン交換層の上方に所定のパターンを有するレジストマスクを形成する工程と、該レジストマスクを使用して該第2のイオン交換層の非マスク部分をエッチングで除去し、リッジを形成する工程と、を包含しており、そのことによって上記目的が達成される。

【0050】ある実施形態では、前記第2のイオン交換層の形成工程は、前記アニール処理イオン交換層の表面に直線状の金属マスクを形成する工程と、該アニール処理イオン交換層のうち該金属マスクに覆われていない部分に前記第2のイオン交換層を形成する工程と、を含み、前記レジストマスクは、該金属マスクの上のみに選択的に形成される。好ましくは、前記レジストパターンは、表面露光を利用して前記金属マスクの上のみに選択的に形成される。

【0051】他の実施形態では、前記第2のイオン交換層の形成工程は、前記アニール処理イオン交換層の表面近傍に前記第2のイオン交換層を形成する工程を含み、前記レジストマスクは、該第2のイオン交換層の表面に直線状に形成される。

【0052】前記リッジの表面に誘電体膜を形成する工程をさらに包含し得る。

【0053】前記基板は、C板の $\text{LiNb}_{1-x}\text{Ta}_x\text{O}_3$ ($0 \leq x \leq 1$)基板であり得る。

【0054】前記第1のイオン交換層及び前記第2のイオン交換層は、いずれもプロトン交換層であり得る。

【0055】本発明の光波長変換素子の製造方法は、非線形光学物質からなる基板の表面近傍に第1のイオン交換層を形成する工程と、該第1のイオン交換層をアニール

処理してアニール処理イオン交換層を形成する工程と、該基板内に分極反転層を形成する工程と、該アニール処理イオン交換層の所定の位置に第2のイオン交換層を形成する工程と、該第2のイオン交換層の上方に所定のパターンを有するレジストマスクを形成する工程と、該レジストマスクを使用して該第2のイオン交換層の非マスク部分をエッチングで除去し、リッジを形成する工程と、を包含しており、そのことによって上記目的が達成される。

【0056】ある実施形態では、前記第2のイオン交換層の形成工程は、前記アニール処理イオン交換層の表面に直線状の金属マスクを形成する工程と、該前記アニール処理イオン交換層のうち該金属マスクに覆われていない部分に前記第2のイオン交換層を形成する工程と、を含み、前記レジストマスクは、該金属マスクの上のみに選択的に形成される。好ましくは、前記レジストパターンは、表面露光を利用して前記金属マスクの上のみに選択的に形成される。

【0057】他の実施形態では、前記第2のイオン交換層の形成工程は、前記アニール処理イオン交換層の表面近傍に前記第2のイオン交換層を形成する工程を含み、前記レジストマスクは、該第2のイオン交換層の表面に直線状に形成される。

【0058】前記リッジの表面に誘電体膜を形成する工程をさらに包含し得る。

【0059】前記基板は、C板の $\text{LiNb}_{1-x}\text{Ta}_x\text{O}_3$ ($0 \leq x \leq 1$)基板であり得る。

【0060】前記第1のイオン交換層及び前記第2のイオン交換層は、いずれもプロトン交換層であり得る。

【0061】本発明の他の局面によれば、非線形光学物質からなる基板と、該基板の表面近傍に形成された、光導波領域を含む第1のイオン交換層と、該光導波領域の近傍に形成された、該第1のイオン交換層のイオン交換濃度より高いイオン交換濃度を有する第2のイオン交換層と、を備える光導波路が提供され、そのことによって上記目的が達成される。

【0062】ある実施形態では、前記第1のイオン交換層が導波方向と実質的に平行な直線状のリッジを有し、該リッジが前記光導波領域を含み、前記第2のイオン交換層は該リッジの側面に形成されている。

【0063】他の実施形態では、前記第2のイオン交換層は、前記第1のイオン交換層の表面に、導波方向と実質的に平行な直線状のリッジを形成している。

【0064】前記基板は、C板の $\text{LiNb}_{1-x}\text{Ta}_x\text{O}_3$ ($0 \leq x \leq 1$)基板であり得る。

【0065】前記第1のイオン交換層及び前記第2のイオン交換層は、いずれもプロトン交換層であり得る。

【0066】本発明のさらに他の局面によれば、非線形光学物質からなる基板と、該基板内に一定周期で形成された分極反転層と、該基板の表面近傍に形成された、光



導波領域を含む第1のイオン交換層と、該光導波領域の近傍に形成された、該第1のイオン交換層のイオン交換濃度より高いイオン交換濃度を有する第2のイオン交換層と、を備える光波長変換素子が提供され、そのことによって上記目的が達成される。

【0067】ある実施形態では、前記第1のイオン交換層が導波方向と実質的に平行な直線状のリッジを有し、該リッジが前記光導波領域を含み、前記第2のイオン交換層は該リッジの側面に形成されている。

【0068】他の実施形態では、前記第2のイオン交換層は、前記第1のイオン交換層の表面に導波方向と実質的に平行な直線状のリッジを形成している。

【0069】前記基板は、C板の $\text{LiNb}_{1-x}\text{Ta}_x\text{O}_3$ ($0 \leq x \leq 1$) 基板であり得る。

【0070】前記第1のイオン交換層及び前記第2のイオン交換層は、いずれもプロトン交換層であり得る。

【0071】

【発明の実施の形態】本発明は、非線形光学効果による第2高調波の発生を利用した光波長変換素子において、基本モードの基本波と高次モードの第2高調波との間の位相整合を利用して両者のオーバーラップを大きくし、基本波から第2高調波への変換効率を高めようとするものである。以下に、まず、その原理について説明する。

【0072】まず最初に、一般の光導波路における光波長変換について説明する。

【0073】通常、光導波路は、図6(a)の断面図に示すように、基板61(屈折率： n_s)とその上に形成された光導波路62(屈折率： n_f)とから構成される。屈折率は $n_f > n_s$ なる関係を満たし、導波するモード(基本モードの基本波64、基本モードの第2高調波65、及び1次モードの第2高調波66)の電界分布は、図6(b)に示すようになる。基本波と第2高調波との電界のオーバーラップは、図6(b)から分かるように、基本モードの基本波64と基本モードの第2高調波65との間が最も大きく、第2高調波の導波モードの次数が高くなるに従って、オーバーラップは低下する。光波長変換素子の変換効率は導波モードのオーバーラップ量に比例するため、上記のようにオーバーラップ量が最も大きい基本モード間の位相整合が、最も変換効率の高い変換となる。

【0074】次に、光導波路の上に、その屈折率 n_f より高い屈折率 n_c を有するクラッド層を形成した場合について、以下に説明する。

【0075】光導波路の上に、より高い屈折率を有するクラッド層を設けると、基本波のモード分布はクラッド層側に偏り、導波モードは素子の表面近傍に強く閉じ込められる。従って、基本波の強い閉じ込めが実現する。クラッド層を有する従来の光波長変換素子では、この基本波の強い閉じ込めを利用して、変換効率の向上を図る。しかし、基本波と第2高調波とは波長が異なり、

その屈折率分散も存在するため、導波モードの分散はそれぞれ異なる(基本波に比べて第2高調波は、より強くクラッド層に引きつけられる)。従って、モード間のオーバーラップの増大には、依然として限界がある。

【0076】上記のような問題点を解決するために、本願発明者らは、高屈折率のクラッド層を利用して第2高調波の導波モードを制御する、新しい方法を見出した。その内容を、以下に説明する。

【0077】先に説明したように、高屈折率のクラッド層を用いると、基本波の閉じ込めを強化することができる。しかし、クラッド層を厚くしていくと、基本波の閉じ込めが強まる一方で、波長の短い第2高調波はクラッド層の内部に閉じ込められて、素子の変換効率が極端に減少する。

【0078】しかし、本願発明者らの解析によって、第2高調波の高次導波モードが光導波路部分に電界分布を持ち、基本波と十分なオーバーラップを達成し得ることを発見した。これを、図7(a)～(d)を参照して説明する。図7(a)～(d)のそれぞれにおいて、図の左側には光波長変換素子の断面構造を示し、図の右側には、導波路断面の深さ方向の電界分布を表す。これらの図は、高屈折率のクラッド層を有する光導波路において、クラッド層の厚みを変化させた場合の導波モードの様子を表したものである。

【0079】図7(a)は、図6(a)及び(b)を参照して説明したクラッド層が無い構成である。ここでは、その説明は省略する。

【0080】図7(b)は、基板61の上に設けられた光導波路62の上に、さらに薄いクラッド層63が設けられている場合である。クラッド層63は、0次(基本モード)の基本波64及び0次(基本モード)の第2高調波65のそれぞれに対して、カットオフ条件(すなわち、それらの導波モードがクラッド層63の内部に閉じこもらない条件)を満足している。従って、0次(基本モード)の基本波64及び0次(基本モード)の第2高調波65は、ともにクラッド層63の内部のみを導波することができず、光導波路62の内部を伝搬する。但し、クラッド層63により、0次(基本モード)の基本波64及び0次(基本モード)の第2高調波65の電界分布は、素子の表面近傍に引き寄せられている。

【0081】図7(c)は、より厚いクラッド層63が設けられている場合であって、基本波64に対してはクラッド層63はカットオフ条件を満足しているが、第2高調波に対しては、低次のモード65(この場合は基本モード)の伝搬が可能となる。このとき、基本波の閉じ込めは、図7(b)の構成に比べてさらに強くなる。しかし、基本モードの第2高調波65がクラッド層63の内部に閉じこもってしまうために、基本波から基本モードの第2高調波への変換効率は極端に低下する。一方、第2高調波のうちで、クラッド層63を導波可能なモー

ド（ここでは0次モード65）の次数よりも一つ高い次数のモード（ここでは1次モード66）は、その大部分が光導波路62を伝搬する。

【0082】このとき、光導波路62の内部における1次モードの第2高調波66の電界分布は、図7（a）に示したクラッド層が無い構成における基本モードの第2高調波65の電界分布とほとんど変わらない。それに対して、0次の基本波の導波モード64は、強くクラッド層63に引きつけられている。即ち、基本モード（0次）の基本波64は閉じ込めの強い導波モードになるのに対し、高次モードの第2高調波（例えば1次の第2高調波66）は、クラッド層63が存在しない構成からほとんど変化しない。そのため、両モード間のオーバーラップを飛躍的に増大することができて、これにより、変換効率が大幅に向上される。

【0083】図7（d）は、さらに厚いクラッド層63が設けられて、0次の基本波64がクラッド層63の中を導波可能となった場合である。しかし、このように基本波がクラッド層63の内部を導波可能となると、光導波路62の内部での基本波と第2高調波とのオーバーラップが極端に減少するために、変換効率は大幅に低減する。

【0084】以上より、本願発明者による検討の結果として、高屈折率のクラッド層63を有する光導波路62においては、図7（c）の構成の場合に、基本モード（0次）の基本波64と高次モード（1次）の第2高調波66との間のオーバーラップが増大して、高効率の波長変換が可能となることが見出された。

【0085】しかし、図7（c）の構成を実現するには、いくつかの条件を満足する必要がある。

【0086】まず第1に、クラッド層63が、「基本波がその内部を導波できない」という基本波に対するカットオフ条件を満足するような厚さ及び屈折率を有している必要がある。一方、クラッド層63が、「基本波がその内部を導波できる」という基本波に対する導波条件を満足している状態とは、実際には図7（d）の構成に対応し、高効率の波長変換は不可能である。

【0087】第2に、図7（c）に示すように、第2高調波の導波モードとして、光導波路62の部分に電界分布のピークを有するような高次モードを導波させる必要がある。その理由は、基本波から第2高調波への波長変換に寄与するのは、光導波路62の内部における基本波の電界と第2高調波の電界とのオーバーラップであるからである。この条件を満足させるためには、クラッド層63が第2高調波の導波条件を満足し、かつ、クラッド層63を導波可能な次数の導波モードより一つ高い次数の高次の導波モードの第2高調波が光導波路62の内部を選択的に導波される必要がある。例えば、図7（c）の場合には、クラッド層63を導波可能な第2高調波の導波モードは基本モード（0次モード）65であり、一

方、光導波路62にピークを有する第2高調波の導波モードは1次モード66である。

【0088】従って、光導波路62の上に高屈折率のクラッド層63が設けられている構成を有する高効率の波長変換素子を実現するには、クラッド層63の厚さ及び屈折率を、基本波に対してはカットオフ条件を満足し、且つ第2高調波に対しては導波条件を満足するように設定すればよい。

【0089】第3に、高効率の波長変換を実現するためには、図7（c）の状態において、光導波路62の内部における高次モードの第2高調波66の電界分布を、クラッド層63の内部における電界分布に対して十分に大きくする（すなわち、クラッド層63の内部における電界分布を十分に小さくする）必要がある。

【0090】ここで、クラッド層63の屈折率 n_c と光導波路62の屈折率 n_f との比（ n_c/n_f ）と、クラッド層63の第2高調波強度のピーク値 I_c と光導波路62の第2高調波強度のピーク値 I_w との比（ I_c/I_w ）との間の関係を、図8に示す。これより、クラッド層63及び光導波路62における第2高調波の強度分布の比は、それぞれの屈折率の比の大きさに逆比例し、光導波路62の屈折率に対してクラッド層63の屈折率が増大するにつれて、クラッド層63における電界分布が小さくなる。

【0091】図8の関係より、クラッド層63における電界強度を光導波路62における電界強度の $1/10$ 以下にして第2高調波光の利用効率を上げるには、クラッド層63の屈折率 n_c を光導波路62の屈折率 n_f に対して $n_c > 1.02 \cdot n_f$ という条件を満たすように設定すれば十分である。サブピーク部分の第2高調波は損失となるが、上記の条件で出射された第2高調波を集光するとサブピークによる出力特性の劣化は観測されず、回折限界までの集光特性が実現できる。

【0092】上記では、クラッド層が単層である構成について説明しているが、クラッド層が多層膜である場合についても、同様の効果が得られる。特に、多層膜から構成されたクラッド層を用いると、クラッド層の内部における屈折率分布を制御することが可能になるので、素子設計の自由度が増し、許容度の高い素子の作製が可能となる。

【0093】また、クラッド層は、非線形効果を持たない線形材料で形成されることが望ましい。クラッド層を非線形材料で構成するとクラッド層の内部で波長変換が生じるが、そのようなクラッド層内部での波長変換は、光導波路の内部での第2高調波光の発生効率に対する損失となるからである。

【0094】また、本発明の構成を3次元光導波路に適用すると、光導波路の横方向の電界分布に対しても、大きな影響を与えることができる。即ち、高屈折率のクラッド層を光導波路の上に形成することにより、第2高調

波及び基本波に対する実効屈折率が増大する。このため、横方向の電界分布の閉じ込めが、基本波及び第2高調波のそれぞれについて、大幅に増大する。これによって、光のパワー密度の増大、及び横方向でオーバーラップの増大が得られて、結果として、変換効率の向上が可能となる。

【0095】また、本発明によれば、基本波の波長を選択することにより、光導波路を伝搬する第2高調波の導波モードを一義的に選択できる。このため、基本波と高次モードの第2高調波との間の位相整合を選択的に行って両者の間のオーバーラップを大きくして、高効率な波長変換を実現することが可能となる。

【0096】さらに、本願発明者らの検討によれば、上記の本発明による光導波路の構造が、耐光損傷強度の向上に非常に有効となることがわかった。

【0097】光損傷は、短波長光（第2高調波）によって結晶内部の不純物が励起され、内部電界を生じることにより発生する。さらに、基本波が介在すると、不純物をトラップする単位を励起して、光損傷による内部電界が固定化する傾向にある。この現象は、第2高調波の電界分布の近傍で基本波が単独で存在する部分で、顕著に現れる。一方、本発明の構成をとれば、光導波路内での基本波と第2高調波とのオーバーラップが増大して、第2高調波及び基本波の電界分布のうちで、オーバーラップしない部分が減少する。そのため、上記のようにして生じる光損傷の発生が、大幅に低減できる。

【0098】以上に説明した本発明の光導波路の構造は、光導波路を伝搬する異なる波長の光のオーバーラップを高めて、両者の間の相互作用を増大させるのに有効である。具体的には、光波長変換素子のみならず、波長の異なる2つ以上の光を同時に導波させる光導波路に対して、有効である。さらに、光の分布を素子表面の近傍に引き寄せることができるために、表面上に形成された構成要素（例えば電極）による導波光への影響を高めることが可能となり、高い動作効率を有する光集積回路素子を構成することが可能となる。

【0099】次に、具体的な素子構造を参照して、本発明の光波長変換素子の実施形態を説明する。

【0100】具体的な素子構造としては、(1) 周期状の分極反転層を有する結晶の表面に高屈折率層を有し、さらに高屈折率層上に、ストライプ状のクラッド層を有する、装荷型光導波路を用いた素子構造、(2) 周期状の分極反転層を有する結晶の表面に、ストライプ状のリッジ形状に加工された高屈折率層を有し、さらにこのリッジの表面にクラッド層を有する、装荷リッジ型光導波路を用いた素子構造、及び(3) 周期状の分極反転層を有する結晶の表面にストライプ状の高屈折率層を有し、さらに結晶表面にクラッド層を有する、埋め込み型光導波路を用いた素子構造、が挙げられる。以下では、各素子構造について、実施形態の中で説明する。

【0101】（第1の実施形態）本実施形態では、装荷型光導波路を用いた光波長変換素子を説明する。

【0102】図9は、本実施形態における光波長変換素子の構造を示す図である。具体的には、図9の(a)は、光波長変換素子の斜視図であり、(b)は断面図である。

【0103】本実施形態の光波長変換素子では、C板のLiTaO₃結晶（すなわち、その上面及び底面が、結晶のC軸に垂直な面である）からなる基板101の内部に、周期 $\Lambda \approx 3.5 \mu\text{m}$ （周期 Λ は、図9では参照番号108として示されている）の分極反転層104が形成されている。分極反転層104の幅Wは、約 $1.7 \mu\text{m}$ である（幅Wは、図9では参照番号109として示されている）。さらに、LiTaO₃結晶基板101の表面には、深さ約 $2 \mu\text{m}$ の光導波路として機能するプロトン交換層105と、ストライプ状のNb₂O₅クラッド層（装荷層）110が形成されている。さらに、Nb₂O₅クラッド層110を含む結晶基板101の表面は、SiO₂からなるカバー層111で被われている。

【0104】素子の端面から入射した波長約850nmの基本波106は、プロトン交換層105を伝搬しながら、波長約425nmの第2高調波107に変換され、他方の端面から出射される。

【0105】図9の構成では、従来技術による構成とは異なり、クラッド層110として、基板101より高い屈折率を有するNb₂O₅を用いている。具体的には、波長約800nmの光に対して、Nb₂O₅の屈折率は約2.25であり、LiTaO₃の屈折率は約2.15である。但し、素子内部を伝搬する基本波106がクラッド層110の内部に閉じ込まないように、クラッド層110の厚さは約300nmに設定している。

【0106】素子内部を伝搬する波長約850nmの基本波106は、基本モード（TM00モード）で伝搬する。一方、第2高調波107は、素子の深さ方向には1次モードで伝搬し、素子の幅方向には0次の高次モード（TM01モード）で伝搬する。分極反転層104の周期108に対する基本波106の波長を選択することにより、第2高調波107の導波モード（TM01）が選択的に励振される。本実施形態の構成では、従来技術による構成とは異なり、基本波を基本モードで伝搬させ、第2高調波を高次モードで伝搬させることによって、両者の間のオーバーラップを増大させ、波長変換効率を向上させている。

【0107】次に、本実施形態の光波長変換素子の構造における、基本波と第2高調波との間のオーバーラップの増大による波長変換効率の向上の原理について、以下に説明する。

【0108】本実施形態に示すように、基板101の上に設けられた光導波路（プロトン交換層）105の上にさらにクラッド層110が形成されている構造を有する

光波長変換素子において、基本波を第2高調波に変換する効率は、基本波と第2高調波との間のオーバーラップに大きく依存する。図10を参照すれば、基本波と第2高調波との間のオーバーラップ122とは、基本波の電界

(E_w)の分布120と第2高調波の電界(E_{2w})の分布121との非線形物質内における重なり(図10でハッチングされている領域)で表される。

【0109】光導波路層105の上に基板101より屈折率の低いクラッド層(例えば、屈折率 $n=2.0$ の Ta_2O_5 膜)131を有する光導波路や埋め込み型光導波路

(図11(a)参照)においては、図11(c)に示すように、基本モード(TM00モード)の基本波の電界分布123と第2高調波(TM00モード)の電界分布124との間で、最大のオーバーラップ125が得られる。しかし、基本波及び第2高調波の波長分散特性により、素子の深さ方向におけるオーバーラップ125の大きさは限られている。

【0110】一方、光導波路層105の上に基板101より屈折率の高いクラッド層(例えば、屈折率 $n=2.25$ の Nb_2O_5 膜)132を有する本発明の光波長変換素子(図11(b)参照)を導波する光の電界分布を、図11(d)に示す。この場合、基本波(TM00モード)は、高い屈折率を有するクラッド層132により閉じ込めが強くなり、素子の表面近傍にその電界分布126が偏っている。一方、この構成におけるTM01モードの第2高調波の電界分布127は、図11(c)におけるTM00モードの第2高調波の電界分布124とほぼ同じであり、オーバーラップ128は、図11(c)におけるオーバーラップ125に比べて大幅に増大している。この結果、従来の装荷構造の光波長変換素子に比べて、本発明の光波長変換素子の変換効率は、約2倍以上に高効率化されている。さらに、高い屈折率を有するクラッド層132を形成することにより、図11(d)に示すように、TM01モードの第2高調波の電界分布127のうちクラッド層132に存在する割合を非常に小さくできるので、図11(c)に示すTM00モードの第2高調波の電界分布124とほとんど変わらない形状とすることができると見いだされた。

【0111】また、本発明の波長変換素子によって得られる第2高調波出力のビームパターンは、従来の埋め込み型光導波路を伝搬する基本波モードの第2高調波出力のビームパターンと差はなく、回折限界近くまで集光可能な波面特性を示す。

【0112】本願発明者らは、図11(b)の構造においてTM00モードの第2高調波の光発生についても検討を行ったが、TM00モードの第2高調波はクラッド層132の内部に閉じ込めってしまうために、基本波とのオーバーラップは極端に低下することが確認された。すなわち、本発明の構成では、TM00モードの基本波と高次モード(TM01モード)の第2高調波との間で、電界分布

のオーバーラップの大幅な増大が可能になる。

【0113】次に、図12(a)～(d)を参照して、本実施形態の光波長変換素子の作製方法について述べる。

【0114】まず、図12(a)に示されているように、+C面の $LiTaO_3$ 基板101の表面に、光導波路として機能するプロトン交換層105を形成する。具体的には、約260°Cのピロ磷酸中で約14分間の熱処理を行った後に、約420°Cで約8分のアニール処理を行って、光導波路(プロトン交換層)105を形成する。

【0115】次に、基板101の+C面(実際にはプロトン交換層105の表面)に楕円電極112を形成し、基板101の-C面(裏面)に平面電極(不図示)を形成する。そして、両電極間に高圧のパルス電圧(約21kV/mm)を印加して、図12(b)に示すような周期状の分極反転層104を形成する。

【0116】続いて両電極を除去した後に、基板101の+C面(プロトン交換層105の表面)に、図12(c)に示すように、スパッタリング法で Nb_2O_5 膜110を約300nmの厚さに堆積する。さらに、堆積された Nb_2O_5 膜110の上にフォトリソグラフィ法でストライプ状マスクパターン(不図示)を形成し、 CHF_3 ガス雰囲気中でドライエッチングを行って、図12(d)に示すように Nb_2O_5 膜110をストライプ状に加工する。

【0117】以上のような電界印加による分極反転層の形成プロセスにおいて重要なことは、印加電圧波形である。具体的には、 $LiTaO_3$ に短周期の分極反転層104を形成するには、パルス電圧波形として、反転電圧レベル(分極が反転する電圧レベルであり、 $LiTaO_3$ では約21kV/mm)以下の大きさのバイアス電圧にパルス電圧を重ねた電圧波形を印加する必要がある。このとき、バイアス電圧レベルとパルス電圧レベルとの和は、反転電圧のレベル以上である必要がある。

【0118】さらに、上記のプロセスでは、パルス電圧が重畳された電圧を印加した後にさらにバイアス電圧のみを印加するが、本願発明者らの検討によれば、そのバイアス電圧印加時間(T_b)が分極反転層の形状の均一性に影響を与えることが明らかになった。すなわち、 T_b が約2秒以下であると、形成される分極反転層104の周期構造の不均一性が大きくなる。分極反転層104の周期構造の均一性を得るには、 T_b を約3秒以上に設定する必要がある。本願発明者らのさらなる検討によれば、好ましくは約5秒以上にすることで、非常に均一性の高い周期的分極反転層104が形成され、効率の高い光波長変換素子が製造できることが明らかになった。

【0119】次に、以下では、光導波路を伝搬する導波モードと光波長変換素子の特性との関係について、詳細に説明する。

【0120】 Nb_2O_5 クラッド層を有する光導波路の導波特性を解析する目的で行った屈折率分散特性の測定結果

を、図13に示す。図13では、 LiTaO_3 基板（線132）及び Nb_2O_5 クラッド層（線131）の屈折率分散の測定結果が示されている。

【0121】これより、波長により LiTaO_3 基板と Nb_2O_5 クラッド層との間の屈折率差が異なり、基本波の波長に相当する800nm帯における基板とクラッド層との間の屈折率差に比べて、第2高調波の波長に相当する400nm帯における屈折率差が、大きくなっている。

【0122】この結果に基づいて行った装荷型光導波路の導波特性の解析結果を、図14に示す。図14は、光導波路を導波する光の波長及びクラッド層（装荷層）の厚さに対して、クラッド層の内部を伝搬可能な導波モードの関係を示す特性要因図である。

【0123】領域Iでは、クラッド層の内部を光が伝搬することができず、導波層のみが、光を伝搬可能な領域として機能する。領域IIでは、基本モードの光のみがクラッド層の内部を伝搬可能であり、一方、領域IIIでは、クラッド層を基本モード及びTM01モードの光が伝搬可能である。

【0124】各々の領域での導波モードについて、以下にさらに説明する。

【0125】まず、第1の場合として、クラッド層152の厚さが約0.1 μm よりも小さい場合には、波長約430nmの第2高調波と波長約860nmの基本波とは、いずれも領域Iに分類される。従って、クラッド層152の内部を伝搬可能な導波モードは存在しない。そのために、伝搬光の電界分布の形状は図15(a)に示すようになり、基本波モードの基本波153と基本モードの第2高調波154とがいずれも光導波層151の内部を伝搬して、クラッド層152の内部における伝搬光の電界分布は小さくなる。

【0126】次に、第2の場合として、クラッド層152の厚さが約0.1 μm から約0.36 μm の間にある場合には、波長約430nmの第2高調波は領域IIに分類され、クラッド層152の内部を基本モードの第2高調波154が伝搬可能である。一方、波長約860nmの基本波153は領域Iに分類され、クラッド層152の内部を伝搬することは不可能である。この結果、基本モードの第2高調波154は、図15(b)に示すようにクラッド層152の内部に閉じ込められてしまうが、基

本波153は導波層151の内部を伝搬する。

【0127】さらに、第3の場合として、クラッド層152の厚さが約0.36 μm よりも大きい場合には、波長約430nmの第2高調波は領域IIIに分類される一方で、波長約860nmの基本波は領域IIに分類される。従って、基本波及び第2高調波のそれぞれについて、クラッド層152における基本モードの伝搬が可能となり、基本モードの基本波153及び基本モードの第2高調波154は、どちらもクラッド層152の内部に閉じ込められる。

【0128】上記の各々の場合における基本波及び第2高調波の電界分布のオーバーラップを考えると、第1の場合には、非線形性を有する光導波層における電界分布が大きく、オーバーラップは光導波層の内部に存在する。しかし、第2の場合には、第2高調波がクラッド層内に閉じ込められてしまうため、光導波層におけるオーバーラップは非常に小さくなる。さらに、第3の場合には、基本波及び第2高調波がどちらもクラッド層内に閉じ込められてしまうために、光導波路における両者のオーバーラップは、0に近くなると予想される。

【0129】しかし、本願発明者らの実験によれば、第3の場合に相当する厚さを有するクラッド層については、基本波がクラッド層内に閉じ込められてオーバーラップが減少して、変換効率の大幅な低下が観測されるものの、第2の場合に相当する厚さを有するクラッド層については、第2高調波への変換効率の大幅な向上が達成されて、第1の場合における値よりも大きい値が得られた。そこで、導波特性についてさらに検討したところ、変換効率の大幅な向上が得られる第2の場合においては、第2高調波の導波モードが、基本モードではなく高次の導波モードであることが発見された。すなわち、上記の第2の場合には、基本モードの基本波と高次モードの第2高調波との間における電界分布のオーバーラップの増大によって、変換効率の向上が実現していることが見出された。

【0130】クラッド層の厚さと変換効率が最大となる第2高調波の導波モードとの関係を、以下の表1に示す。

【0131】

【表1】

	クラッド層の厚さ	第2高調波の導波モード	第2高調波出力
1	<約0.1 μm	0次(TM00)	Δ
2	約0.1 μm ～約0.3 μm	1次(TM01)	\odot
3	約0.3 μm ～約0.36 μm	2次(TM02)	\odot
4	約0.36 μm <	高次	\times

【0132】「第2高調波出力」の欄の記号(\odot 、 Δ 、及び \times)は、得られる第2高調波出力の大きさ（波長変換効率の大きさ）を相対的に表すものであって、記号 \odot

が変換効率がよいことを意味し、記号 \times は変換効率が悪いことを意味し、記号 Δ はその中間を意味している。

【0133】図16(a)～(d)は、上記表1の

(2) に示すクラッド層の厚さが約 $0.1\mu\text{m}$ ～約 $0.3\mu\text{m}$ の領域における光の伝搬状態を示す図である。図16

(a) の屈折率分布に示すようにクラッド層162の屈折率が導波層161の屈折率より低い場合(クラッド層162が設けられていない場合も含む)には、図16

(b) に示すように、導波層161の内部に基本モードの基本波163及び基本モードの第2高調波164が存在している。一方、図16(c)の屈折率分布に示すようにクラッド層162の屈折率が導波層161の屈折率より大きい場合には、図16(d)に示すように、基本モードの第2高調波164はクラッド層162の内部に閉じ込められるが、TM01モードの第2高調波165は光導波層161の内部を伝搬して、基本モードの基本波163とのオーバーラップが大幅に向上する。特に、TM01モードの第2高調波の電界分布165の大部分は光導波層161に存在して、非線形性の小さいクラッド層162には電界がほとんど存在せず、しかも基本波163の閉じ込めが強くなるために、オーバーラップの向上による変換効率の大幅な増大が可能となる。ここで、第2高調波に関しては、その波長選択性により所望の導波モードを効率よく励起できるので、上記に述べた内容に従って、高い変換効率をもたらす所望の導波モードの第2高調波を選択的に励起できる。

【0134】また、高次モードの第2高調波の電界分布について、クラッド層に存在する部分と導波層に存在する部分との比は、クラッド層と導波層との屈折率差に依存する。屈折率差が大きい場合は、電界分布のうちで光導波層に存在する部分が大きくなり、クラッド層での電界のピークが小さくなる。一方、屈折率差が小さい場合は、電界分布のうちで光導波層に存在する部分が小さくなり、クラッド層での電界のピークが大きくなる。

【0135】一方、基本波の電界分布に対しては、クラッド層と導波層との屈折率差が小さい方が有利である。すなわち、屈折率差が小さいと、図14に示す領域Iに相当するクラッド層の厚さの範囲が広がり、厚さの制御に関する制約が緩和される。さらに、第2高調波への変換効率は、TM01モードの第2高調波とTM00モードの基本波との間の結合によって得られる値よりも、TM02モードの第2高調波とTM00モードの基本波との間の結

合によって得られる値の方が、大きくなる。この条件を満足するには、クラッド層と基板との屈折率差の関係が、 $\Delta N_{2\omega}$ (波長 400nm 帯の光に対する基板とクラッド層との屈折率差) $>\Delta N_{\omega}$ (波長 800nm 帯の光に対する基板とクラッド層との屈折率差)なる関係を満たすことが望ましい。先に図13を参照して説明したように、 Nb_2O_5 クラッド層は、 LiTaO_3 基板に対して $\Delta N_{2\omega} > \Delta N_{\omega}$ の関係を満足するので、非常に有効である。

【0136】また、第2高調波が高次モードの場合、出射された第2高調波の集光特性が劣化する場合がある。例えば、ステップ状の屈折率分布を有する埋め込み型光導波路において、1次の第2高調波の導波モードはTM01モードとなる。従って、この第2高調波を集光すると2つのピークを有する集光ビームとなり、単一のビームスポットに集光するにはビーム成形処理が必要となる。しかし、 Nb_2O_5 装荷型光導波路を伝搬する第2高調波の高次モードは、基本モードとほぼ同様の集光特性を有し、回折限界までの集光が可能である。これは、第2高調波に対する導波層と基板との間の屈折率差($\Delta n_1 \approx 0.02$)がクラッド層との間の屈折率差($\Delta n_2 \approx 0.3$)に比べて非常に小さいために、図16(d)に示すように、クラッド層における導波モードの電界分布が光導波層における電界分布に比べて非常に小さくなるためである。

【0137】第2高調波の集光特性を劣化させない第2高調波の高次モードを実現するには、 $3\Delta n_1 < \Delta n_2$ が必要である。 Δn_2 が小さいとクラッド層における電界分布が大きくなり、変換効率の低下及び集光特性の劣化の原因になる。

【0138】次に、光波長変換素子の効率向上を目的としたクラッド層の最適構造を得るための設計について、以下に述べる。

【0139】まず、最適なクラッド層の厚さについて、 Nb_2O_5 を例にとって検討した。表2は、クラッド層の厚さに対する、基本波及び第2高調波の導波状態、ならびに第2高調波への変換効率を示す。

【0140】

【表2】

厚さ(nm)	50	80	120	200	300	330	350	400	450
基本波導波モード	0次	0次	0次	0次	0次	0次	0次	1次	1次
第2高調波導波モード	0次	0次	1次	1次	1次	2次	2次	2次	2次
変換効率	△	△	○	◎	◎	◎	○	×	×

【0141】「変換効率」の欄の記号(◎、○、△、及び×)は、波長変換効率の大きさを相対的に表すものであって、記号◎が変換効率が高いことを意味し、記号×は変換効率が悪いことを意味し、記号○及び△はその中間を意味している。

【0142】クラッド層の厚さが約 100nm 以下の場合には、変換効率が最大となるのは基本波及び第2高調波が基本モードである場合であって、この場合の変換効率は、埋め込み型光導波路とあまり変わらない。厚さが約 100nm 以上になると、1次(TM01)モードの第

2高調波との結合が増大しはじめて、変換効率が向上する。さらに約200nm以上の厚さでは、1次モードの第2高調波への変換が非常に大きくなり、従来の埋め込み型や装荷型光導波路を用いた光波長変換素子の2倍以上の変換効率が得られる。さらに、クラッド層の厚さが約300nm近傍であると、2次(TM02)の第2高調波への変換が行われて、変換効率はさらに向上する。しかし、クラッド層の厚さが約400nm近傍或いはそれ以上になると、クラッド層の内部に基本波が閉じ込められるため、変換効率は大幅に減少する。これより、Nb₂O₅クラッド層の厚さとしては、変換効率の向上のためには約100nm~約380nmが必要である。特に、変換効率が向上する厚さとして、約200nm~約340nmが望ましい。

【0143】図17には、LiTaO₃基板上のプロトン交換層の上に形成したクラッド層の屈折率(基本波波長に対する値)とクラッド層の厚さとの関係を示す。

【0144】領域Iでは、クラッド層が厚すぎるために基本波はクラッド層内に閉じ込められ、変換効率が極端に減少する。領域IIでは、基本波と第2高調波との間のオーバーラップが向上して、変換効率が最大になる。領域IIIでも、クラッド層の設置によって変換効率の向上が見られる。このように、領域II及びIIIで、クラッド層の設置による変換効率の向上が可能である。

【0145】図17から分かるように、クラッド層の屈折率が増大するにつれて、領域II或いはIIIを達成するための最大許容厚さは薄くなり、高精度の厚さの設定が要求される。通常の成膜装置でクラッド層を再現性よく成膜するためには、数100nm以上の厚さが適当であり、屈折率としては約2.8以下が良い。

【0146】また、クラッド層と導波層との間の屈折率差が小さすぎると、クラッド層によるオーバーラップの向上効果が得られない。クラッド層の屈折率が約2.2以上である場合に、基本波と第2高調波との間のオーバーラップが大きくなり、変換効率が大幅に向上する。従って、クラッド層の屈折率は、LiTaO₃基板の場合には、基本波の波長に対して約2.18以上であることが望ましく、特に高効率化のためには約2.2~約2.8の範囲に設定することが好ましい。

【0147】本実施形態ではクラッド層の構成材料としてNb₂O₅を用いたが、その他に、LiNbO₃、TiO₂、ZnS、CeO₂、またはこれらを含む混合材料、例えばTa₂O₅、SiO₂、Al₂O₃、SiN等との混合材料も、利用できる。これらによって形成されるクラッド層は、その屈折率を変えることで、より大きなオーバーラップを得ることができて、変換効率の大幅な向上が可能となる。

【0148】また、本実施形態では、基板としてLiTaO₃基板を用いているが、他にMgO、Nb或いはNdなどをドーピングしたLiTaO₃やLiNbO₃、或いはそれらの混合物であるLiTa_{1-x}Nb_xO₃ (0 ≤ x ≤ 1)、或いはKTP(KTiOPO₄)等

からなる基板を用いても、同様な素子が作製できる。LiTaO₃、LiNbO₃、及びKTPは、いずれも高い非線形性を有し、高効率の光波長変換素子が作製できる。特にKTPは、屈折率が約1.8と低いので、その上に形成されるクラッド層の材料としてTa₂O₅、Al₂O₃、SiN等の利用も可能となり、有効である。また、これらの材料においては、周期的分極反転層の形成方法が確立されており、高効率の光波長変換素子が形成できるため、有効である。

【0149】次に、素子表面に形成されるカバー層について説明する。

【0150】先に説明した図9の構成では、光導波路(詳しくは、プロトン交換層105及びクラッド層110)の表面を、約400nmの厚さのSiO₂カバー層111で覆っている。これは以下の理由による。

【0151】装荷型光導波路では、クラッド層をエッチングにより形成するため、クラッド層の側面に僅かな凹凸が形成されて、導波損失の原因となる。カバー層111でクラッド層を被えば、クラッド層とその他の部分との間の屈折率差が小さくなり、クラッド層の側面の凹凸による導波損失の低減を図ることができる。具体的には、導波損失は、カバー層111を設けることで約1/2以下になる。

【0152】なお、本実施形態ではカバー層111としてSiO₂を用いたが、カバー層111としては基板より屈折率の低い材料が望ましく、例えばTa₂O₅等も有効である。Ta₂O₅膜は屈折率が約2と大きいために、より低損失の光導波路が形成できる。或いは、SiN、Al₂O₃等、高屈折率層よりも小さい屈折率を有し、基本波及び高調波に対して吸収や散乱損失の少ない材料であれば、カバー層として同様の効果が得られる。

【0153】(第2の実施形態)ここでは、本発明の他の構造による光波長変換素子の特性向上について述べる。具体的には、装荷リッジ型光導波路を適用した光波長変換素子について述べる。

【0154】第1の実施形態で、屈折率の高いクラッド層を用いた装荷型光導波路による光波長変換素子の特性向上が確認できた。ここでは、光波長変換素子の構造にさらに工夫を加えることにより、一層の特性向上を試みた結果について述べる。

【0155】装荷型光導波路により基本波のモードプロファイルの制御が可能になることを前述したが、装荷型光導波路において、第2高調波のモードプロファイルへの影響を抑えながら基本波のモードプロファイルを制御し、オーバーラップの向上を図ると、第2高調波の導波モードの幅方向の閉じ込めが弱くなる。その結果、光導波路から出力する第2高調波のビームプロファイルのアスペクト比(出射光をコリメートビームにした場合の縦と横の比)が1:3以上になり、厚み方向の広がり角が幅方向に比べて大きくなる。このため、回折限界の集光特性を得るための光の利用効率が大幅に減少するといった

問題が生じる。これを解決するため、本実施形態では、図18に示す光波長変換素子の構造をとる。

【0156】具体的には、図18の(a)は、光波長変換素子の斜視図であり、(b)は断面図である。本実施形態の光波長変換素子では、C板の LiTaO_3 結晶(すなわち、その上面及び底面が、結晶のC軸に垂直な面である)からなる基板201の内部に、周期 Λ =約 $3.5\mu\text{m}$ (周期 Λ は、図18では参照番号208として示されている)の分極反転層204が形成されている。分極反転層204の幅 W は、約 $1.7\mu\text{m}$ である(幅 W は、図18では参照番号209として示されている)。さらに、 LiTaO_3 結晶基板201の表面には、ストライプ状のリッジ213を有するプロトン交換層205が形成され、リッジ213の上面には、 Nb_2O_5 クラッド層(装荷層)210が形成されている。さらに、 Nb_2O_5 クラッド層210を含む結晶基板201の表面は、 SiO_2 からなるカバー層211で被われている。リッジ213の厚みは約 200nm であり、クラッド層210の厚さは約 300nm である。

【0157】導波路を伝搬する波長 850nm の基本波206は基本モード(TM00モード)で伝搬しており、第2高調波207は、深さ方向には1次モード、幅方向には0次の高次モード(TM01モード)で伝搬していると考えられる。第1の実施形態で説明した装荷型光導波路では、第2高調波107がTM01モードで伝搬しているため、横方向の閉じ込めが弱く、導波モードのアスペクト比が大きくなっている。これに対して、本実施形態の構成では、リッジ213を付けることで横方向の閉じ込めが改善され、第2高調波の導波モードのアスペクト比が改善される。

【0158】次に、装荷リッジ型光導波路の特性について述べる。

【0159】装荷リッジ型光導波路では、プロトン交換層205をリッジ状に加工することにより、第2高調波の幅方向の閉じ込めが強化される。その結果、横方向の第2高調波の導波モードの広がりを、 Nb_2O_5 装荷型光導波路の $2/3 \sim 1/2$ に抑えることが可能となり、横方向の閉じ込めが強化される。そのため、横方向の基本波と第2高調波とのオーバーラップが増大し、装荷型光導波路に比べて変換効率が1.5倍以上に向上する。このように、装荷リッジ構造が光波長変換素子の高効率化に有効であることが明らかになった。

【0160】幅方向の閉じ込めを強くするリッジ213の厚さとしては、約 100nm 以上が必要である。また、幅方向のオーバーラップの増大による光波長変換素子の効率向上が見られたのは、リッジ213の厚さが約 $200\text{nm} \sim 600\text{nm}$ の場合である。リッジ213の厚さが約 1000nm 以上になると、光導波路の伝搬損失が増大して光波長変換素子の特性が劣化する。

【0161】従って、リッジ213の厚みとしては、オ

ーバラップ向上を得るために約 $100\text{nm} \sim 1000\text{nm}$ が必要となる。さらに、変換効率の大幅な向上を得るには、約 $200\text{nm} \sim 600\text{nm}$ が望ましい。

【0162】次に、リッジ213の厚さが約 300nm の光導波路における、光導波路の幅に対する第2高調波のアスペクト比の関係を説明する。

【0163】まず、基本波がマルチモード化することなく導波するには、導波路の幅を約 $10\mu\text{m}$ 以下にする必要がある。さらに、アスペクト比の改善が可能となるのは、導波路幅が約 $8\mu\text{m}$ 以下の場合である。また、アスペクト比が1:1に近づくのは、導波路幅が約 $2\mu\text{m} \sim 4\mu\text{m}$ の場合であり、導波路幅が約 $1\mu\text{m}$ 以下の場合には、変換効率が低下する。

【0164】光導波路構造を装荷リッジ構造にすることにより、装荷型光導波路を用いた光波長変換素子の特性に加えて出力ビームの成形が可能となり、特性の優れた光波長変換素子の作製が可能となる。単一モード光導波路として成り立つためには、光導波路幅は約 $1\mu\text{m} \sim 10\mu\text{m}$ であるのが望ましい。さらにアスペクト比を改善するには、光導波路幅約 $1\mu\text{m} \sim 8\mu\text{m}$ であるのが望ましく、アスペクト比を1:1に近づけるためには、光導波路幅を約 $2\mu\text{m} \sim 4\mu\text{m}$ に制御する必要がある。

【0165】本実施形態ではクラッド層の構成材料として Nb_2O_5 を用いたが、その他に、 LiNbO_3 、 TiO_2 、 ZnS 、 CeO_2 、またはこれらを含む混合材料、例えば Ta_2O_5 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 SiN 等との混合材料も、利用できる。これらによって形成されるクラッド層は、その屈折率を変えることで、より大きなオーバーラップを得ることができて、変換効率の大幅な向上が可能となる。

【0166】また、本実施形態では、基板として LiTaO_3 基板を用いているが、他に MgO 、 Nb 或いは Nd などをドープした LiTaO_3 や LiNbO_3 、或いはそれらの混合物である $\text{LiTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ ($0 \leq x \leq 1$)、或いはKTP等からなる基板を用いても、同様な素子が作製できる。 LiTaO_3 、 LiNbO_3 、及びKTPは、いずれも高い非線形性を有し、高効率の光波長変換素子が作製できる。特にKTPは、屈折率が約1.8と低いので、その上に形成されるクラッド層の材料として Ta_2O_5 、 Al_2O_3 、 SiN 等の利用も可能となり、有効である。また、これらの材料においては、周期的分極反転層の形成方法が確立されており、高効率の光波長変換素子が形成できるため、有効である。

【0167】(第3の実施形態) Nb_2O_5 クラッド層によるオーバーラップの向上効果を埋め込み型光導波路に適用することにより、簡便な構造による変換効率の向上が図れる。図19は、埋め込み型光導波路を用いた本実施形態の光波長変換素子の構成を示す。

【0168】具体的には、図19は、光波長変換素子の斜視図である。本実施形態の光波長変換素子では、C板の LiTaO_3 結晶(すなわち、その上面及び底面が、結晶の

C軸に垂直な面である) からなる基板301の内部に、周期 Λ =約 $3.5\mu\text{m}$ (周期 Λ は、図19では参照番号308として示されている)の分極反転層304が形成されている。分極反転層304の幅 W は、約 $1.7\mu\text{m}$ である(幅 W は、図19では参照番号309として示されている)。さらに、 LiTaO_3 結晶基板301の表面には、ストライプ状のプロトン交換層305が形成されている。さらに、プロトン交換層305を含む結晶基板301の表面には、基板301よりも高い屈折率を有する Nb_2O_5 クラッド層310が形成されている。さらに、クラッド層310を含む結晶基板301の表面は、 SiO_2 からなるカバー層(不図示)で被われている。クラッド層310の厚さは、約 300nm である。

【0169】導波路を伝搬する波長 850nm の基本波306は基本モード(TM00モード)で伝搬しており、第2高調波307は、深さ方向には1次モード、幅方向には0次の高次モード(TM01モード)で伝搬している。分極反転層304の周期308に対する基本波306の波長を選択することによって、第2高調波307の導波モード(TM01モード)を選択的に励振している。また、従来の構成とは異なって、基本波306の導波モードを基本モードとし、第2高調波307の導波モードを高次モードとすることで、両者の間のオーバーラップを増大させて、変換効率の向上を図っている。

【0170】埋め込み型光導波路の上に Nb_2O_5 クラッド層310を約 300nm 堆積すると、基本波306の導波モードの閉じ込めが向上し、第2高調波307と基本波306のオーバーラップが増大する。その結果、光波長変換素子の変換効率が約3倍に向上し、高効率化が達成される。具体的には、クラッド層310の厚さが約 100nm 程度から、基本波306と第2高調波307とのオーバーラップが増大し始め、厚さ約 300nm で最大となる。ところが、厚さが約 400nm で、急激に変換効率が低下する。これは、装荷型光導波路で得られたクラッド層の厚さと第2高調波への変換効率との関係と、ほぼ同じである。

【0171】埋め込み型光導波路は、装荷型光導波路に比べて横方向の光の閉じ込めが強く、第2高調波の出射ビームのアスペクト比は1:2.5程度であり、比較的良好なビーム形状が得られる。

【0172】埋め込み型光導波路の利点は、伝搬損失の小さな光導波路形成が可能なことである。リッジ形状の光導波路は、導波路側面の凹凸により、伝搬損失が増大する傾向にある。本願発明者らにより作製したリッジ型光導波路でも、約 1.5dB/cm の伝搬損失が観測されたのに対し、埋め込み型の光導波路では伝搬損失が 1dB/cm 以下であって、非常に低損失の光導波路の形成が可能であることが確認された。

【0173】さらに、横方向の閉じ込めを向上させる構造として、クラッド層を光導波路上に選択的に堆積させ

る方法を試みた。具体的には、幅約 $5\mu\text{m}$ の光導波路に対してクラッド層の幅を $5\mu\text{m}$ 以下にすることにより、幅方向の閉じ込めが強化され、変換効率が1.2倍に向上した。基本波波長に対するクラッド層の屈折率を約2.18以上にすれば、オーバーラップの向上による変換効率が可能である。特に、屈折率が約2.2~約2.5の範囲では、オーバーラップの向上が高まり、大幅な変換効率の向上が可能である。

【0174】本実施形態ではクラッド層の構成材料として Nb_2O_5 を用いたが、その他に、 LiNbO_3 、 TiO_2 、 ZnS 、 CeO_2 、またはこれらを含む混合材料、例えば Ta_2O_5 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 SiN 等との混合材料も、利用できる。これらによって形成されるクラッド層は、その屈折率を変えることで、より大きなオーバーラップを得ることができて、変換効率の大幅な向上が可能となる。

【0175】また、本実施形態では、基板として LiTaO_3 基板を用いているが、他に MgO 、 Nb 或いは Nd などをドープした LiTaO_3 や LiNbO_3 、或いはそれらの混合物である $\text{LiTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ ($0 \leq x \leq 1$)、或いはKTP等からなる基板を用いても、同様な素子が作製できる。 LiTaO_3 、 LiNbO_3 、及びKTPは、いずれも高い非線形性を有し、高効率の光波長変換素子が作製できる。特にKTPは、屈折率が約1.8と低いので、その上に形成されるクラッド層の材料として Ta_2O_5 、 Al_2O_3 、 SiN 等の利用も可能となり、有効である。また、これらの材料においては、周期的分極反転層の形成方法が確立されており、高効率の光波長変換素子が形成できるため、有効である。

【0176】上記の第1~第3の実施形態で示した装荷型、装荷リッジ型、及び埋め込み型の構成は、低損失で閉じ込めが強く、光波長変換素子としてだけではなく光導波構造としても有望であり、光通信、光計測デバイス等の光導波路素子への応用が可能である。

【0177】次に、埋め込み型光導波路の耐光損傷性の向上を目的とした導波路構造について述べる。

【0178】埋め込み型光導波路は、高屈折率のクラッド層を設けることにより、導波モード間のオーバーラップが増大すると同時に、導波光の閉じ込めが深さ方向及び幅方向ともに非常に強まり、高効率の波長変換が可能になる。また、導波路内での基本波と第2高調波とのオーバーラップを高めることで、基本波の電界分布が単独で存在する領域が減少し、耐光損傷強度の向上が図れる。しかし、光損傷の発生を完全に防止することはできず、例えば約 10mW 以上の第2高調波出力に対して、光損傷の発生が観測される。この特性は、装荷型及び装荷リッジ型の光導波路に比べて、わずかに劣っている。

【0179】そこで、光損傷の発生原因について詳細に検討したところ、光導波路の側部近傍で光損傷による屈折率変化が最も大きいことが見いだされた。一方、装荷型及び装荷リッジ型の光導波路では、導波路の側面近傍にプロトン交換層が存在するために、横方向の閉じ込め

が緩和されるとともに光導波路側部の耐光損傷強度が向上していると考えられる。

【0180】そこで、埋め込み型の光導波路構造においても、耐光損傷強度の向上を目的として、導波路の側面近傍に導波路より屈折率の低い層（基板より屈折率は高い）を設ける方法を試みた。具体的には、図19の構成において、濃度の薄いプロトン交換層を光導波路の側部に形成した。その結果、光導波路の横方向の閉じ込めがわずかに（数％）緩和され、変換効率は約10％低下する。しかし、耐光損傷強度は大幅に増大し、約20mW以上の第2高調波に対しても光損傷が発生しない。プロトン交換層を設けたことによるこの光損傷強度の増大は、光導波路の横方向閉じ込めの緩和によって生じるだけでなく、プロトン交換層（導波路側部）の耐光損傷強度の増大によっても生じる。即ち、プロトン交換層は、基板に比べて電気伝導度が高いため、光損傷の原因となる不純物単位での光励起電荷の寿命が短く、光損傷が発生しにくい。そこで、光損傷の発生しやすい導波路側部に電気伝導度の高いプロトン交換部を設けることで、その部分の耐光損傷強度を増大することができる。

【0181】（第4の実施形態）ここでは、光波長変換素子を用いた短波長光源について述べる。

【0182】前述した実施形態による光波長変換素子の構成により、高効率で安定な光波長変換素子の実現が可能となる。本発明による光波長変換素子を用いた短波長光源の作製の構成を、図20に示す。

【0183】具体的には、上記短波長光源は、Siなどから形成されるサブマウント420の上に搭載された波長800nm帯の基本波光P1を発する半導体レーザ421、及び光波長変換素子422より構成され、半導体レーザ421の発光領域423から出た基本波光P1を光波長変換素子422の導波路402の端面に直接に結合させて集光し、導波モードを励起する。光波長変換素子422の導波路402の他の端面からは、波長変換された第2高調波光P2が出射する。基板420と光波長変換素子422との間には、クラッド層403が形成されている。

【0184】本発明によって変換効率が低い光波長変換素子422が実現するので、出力約100mWの半導体レーザ421を用いて、約10mWの青色の第2高調波光P2が得られる。また、使用される光波長変換素子422は耐光損傷性に優れ且つ安定な出力が得られるので、出力変動を約2％以下に抑えることができ、安定な出力が得られる。

【0185】400nm帯の波長は、印刷製版、バイオ、蛍光分光特性等の特殊計測分野や、光ディスク分野など、広い応用分野において望まれている。本発明による光波長変換素子を用いた短波長光源は、出力特性及び安定性の両方の観点から、これらの応用分野での実用化が可能である。

【0186】なお、半導体レーザ421の光を集光光学系を用いて光波長変換素子422の導波路402に結合させる構成であってもよい。但し、半導体レーザ421と光波長変換素子422の光導波路402を直接結合させる構成のほうが、小型且つ低価格の光源が実現できる。

【0187】（第5の実施形態）ここでは、短波長光源を光ディスクのピックアップ用光源として用いた光ピックアップについて説明する。

【0188】光ディスクでは高密度記録が望まれており、小型の短波長光源の実現が必要不可欠である。光ディスクを読み取るためのピックアップは、光源、集光光学系、及び受光部分を含む。具体的には、図21に示すように、Siサブマウント520の上に半導体レーザ521及び光波長変換素子522が搭載された光源から発せられた光P1は、レンズ540で平行光にされ、ビームスプリッタ541を通過してからレンズ542で集光されて、光ディスク543を照射する。光ディスク543からの反射光は、レンズ542で平行光にされた後に、ビームスプリッタ541及びレンズ544を介して、光検出器545に集光される。

【0189】光源として本発明による光波長変換素子を用いると、波長400nm帯の青色光を光ディスクの読み取り光源として利用できるため、記録密度を2倍に向上させることが可能となる。さらに、高出力の青色光の発生が可能となるため、読み取りだけでなく、光ディスクへ情報を書き込むことも可能となる。半導体レーザを基本波光源として用いることで、非常に小型になり、民生用の小型光ディスク読み取り及び記録装置にも利用できる。

【0190】さらに、光波長変換素子は、光導波路幅を最適化することで、出力ビームのアスペクト比の最適化が行える。例えば、装荷リッジ型導波路構造を有する光波長変換素子において、光導波路の幅を約3 μ mにすることにより、アスペクト比を1:1に近づけることが可能となる。この結果、光ピックアップの集光特性を向上させるためのビーム成形プリズムなどが不要になり、高い伝達効率、優れた集光特性、及び低価格化が実現できる。さらに、ビーム成形時に発生する散乱光のノイズが低減でき、ピックアップの簡素化が実現できる。

【0191】（第6の実施形態）本実施形態では、閉じ込めの強い光導波路の構成について述べる。

【0192】第1の実施形態で説明した光波長変換素子の構造は、光導波路構造としても有効な構造である。そこで、図9に示した光波長変換素子における光導波路の特性について説明する。

【0193】具体的には、図22(h)に示すように、LiTaO₃基板の上にプロトン交換層からなる光導波路が形成され、さらにその上にNb₂O₅からなるクラッド層が形成されている光波長変換素子に、波長約860nmの光



を導波させて、導波光の電界分布の観測を行った。比較のために、 Ta_2O_5 からなるクラッド層が形成されている装荷型光導波路(図22(g)参照)の導波光の電界分布も測定した。波長約860nmの光に対する屈折率は、プロトン交換層(光導波層)が約2.16、 Ta_2O_5 層が約2.0、 Nb_2O_5 層が約2.25である。

【0194】厚さ約2 μm のプロトン交換層の上に厚さ約300nm且つ幅約5 μm のストライプ状のクラッド層を形成した装荷型光導波路の電界分布を、図22

(a)～(f)を参照して説明する。

【0195】まず最初に、深さ方向の分布から説明する。図22(a)及び(b)は、 Ta_2O_5 からなるクラッド層が形成されている装荷型光導波路と Nb_2O_5 からなるクラッド層が形成されている装荷型光導波路についての、深さ方向の導波光の電界強度分布であり、図22(c)及び(d)は、それぞれの構造における深さ方向の屈折率分布である。 Ta_2O_5 からなるクラッド層が形成されている場合の深さ方向の電界強度分布(図22(c)参照)は、半値全幅で約3 μm に広がっているのに対し、 Nb_2O_5 からなるクラッド層が形成されている場合の深さ方向の電界強度分布(図22(d)参照)の半値全幅は約2.5 μm にまで減少し、光導波路の閉じ込めが大幅に向上している。他の材料(例えば、 SiO_2 や Al_2O_3)からなるクラッド層についても検討した結果、深さ方向の導波光の電界強度分布は、光導波層の屈折率(約2.16)以下の屈折率を持つクラッド層ではほとんど変わらない。従って、深さ方向の光の閉じ込めを向上させるには、クラッド層として、導波層より屈折率の高い層を形成する必要がある。

【0196】次に、幅方向の導波光の電界強度分布を、図22(e)及び(f)にそれぞれ示す。幅方向の閉じ込めに関しても、 Ta_2O_5 からなるクラッド層が形成されている場合(図22(e)参照)には、半値全幅で約6 μm 以上に広がっているのに対して、 Nb_2O_5 クラッド層(図22(f)参照)では、半値全幅が約5 μm まで低減されて、幅方向に閉じ込めの強い光導波路が形成されていることがわかる。

【0197】以上の結果、導波層より屈折率の高いクラッド層を設けることにより、閉じ込めの強い光導波路が形成できることが明らかになった。閉じ込めの強い光導波路は、導波する光のパワー密度の増大が図れて光の制御効率が向上するため、光導波路を用いた電気光学素子や非線形光学素子に有効である。

【0198】(第7の実施形態)ここでは、光波長変換素子の特性をさらに向上する方法を検討する。

【0199】クラッド層に屈折率の高い層を設けることにより基本波の導波モードの形状を制御することが可能となるので、導波モードの形状制御を容易にするために図23に示す構造を形成する。具体的には、クラッド層を多層膜構造にすることにより、導波モードの制御を容

易にする。

【0200】図23の(a)は、光波長変換素子の斜視図であり、(b)は断面図である。図23の構成は、クラッド層が、 SiO_2 層712と Nb_2O_5 層710との多層構造になっている以外は、図9を参照して説明した構成と同じである。対応する構成要素には、対応する類似した参照番号を付しており、その説明を省略する。

【0201】導波モードのプロファイルを基板表面側に引き寄せ、基本波と第2高調波とのオーバーラップを向上させるには、多層膜内に基板より屈折率の高い層が必要である。ここでは、 Ta_2O_5 と Nb_2O_5 との多層膜によるクラッド層を形成する。多層膜の厚さを制御することにより、オーバーラップの向上が図れて変換効率が向上することを確認した。

【0202】次に、光導波路の屈折率分布を対称化することによる変換効率の向上について述べる。

【0203】屈折率分布が深さ方向に対して対称な構造になれば、基本波と第2高調波とのオーバーラップを大幅に向上させることができる。そのためには、クラッド層として、基板と等しい屈折率を持つ材料が必要となる。基板である LiTaO_3 は、860nmの光に対する屈折率が約2.15である。そこで、この値に近い屈折率をもつクラッド層を形成するため、 Ta_2O_5 と Nb_2O_5 との混合膜をクラッド層に用いた。 Ta_2O_5 及び Nb_2O_5 の屈折率は、それぞれ約2.0及び約2.25であり、混合比を制御することにより、全体の屈折率を上記の値(2.15)に近づけた。

【0204】成膜は、 Ta_2O_5 及び Nb_2O_5 の混合ターゲットを用いるスパッタ蒸着により行う。クラッド層を厚さ約500nmに堆積し、図23の構成による光波長変換素子を作製したところ、オーバーラップの増大による変換効率の大幅な向上を確認できた。

【0205】このように、クラッド層に基板と同じ屈折率の膜を用いることで、光波長変換素子の変換効率向上が達成できる。変換効率の向上は、クラッド層の屈折率が LiTaO_3 基板の屈折率以上で且つ導波層の屈折率より小さい場合である。

【0206】(第8の実施形態)ここでは、耐光損傷強度に優れた光波長変換素子構造について述べる。

【0207】光損傷とは、光導波路を導波する光により導波路の屈折率が変化し、出力が不安定になる現象で、特に短波長光に対して顕著に表れる。光波長変換素子は基本波を波長変換して短波長の第2高調波(波長:緑～青～紫外)を発生させるが、光損傷により導波路の屈折率が変化すると、第2高調波出力が変動して波長変換特性が不安定になる。

【0208】以下では、光損傷を低減するため構造について行った検討結果を述べる。

【0209】従来の埋め込み型光導波路を用いた光波長変換素子の耐光損傷性を測定した。基板に LiTaO_3 を用



い、波長約860nmの基本波を波長変換して約430nmの第2高調波の発生を行ったところ、数mWの第2高調波の出力で光損傷が生じ、出力が不安定になることが明らかになった。そこで、光損傷の原因について検討を行った結果、次のことを発見した。

【0210】第1に、プロトン交換を行うことによりプロトン交換部分の電気伝導度が向上し、これによって耐光損傷強度が向上する。

【0211】第2に、光損傷は、導波路内部の耐光損傷強度だけでなく、導波路周辺部の耐光損傷強度の影響を受ける。埋め込み型光導波路は、光導波路周辺部の電気伝導度が低く光損傷が生じ易くなっているため、プロトン交換光導波路周辺部において光損傷が発生している。

【0212】第3に、分極反転周期のデューティ比(分極反転部の幅 W /分極反転周期 Λ)の不均一性が光損傷特性に影響を与える。光損傷は、光により励起される電界により、電気光学効果を介して屈折率変化が生じる現象である。このため、周期的な分極反転構造により光励起電界を相殺し、屈折率変化を低減することが可能となる。しかし、埋め込み型光導波路では、周期状の分極反転構造のデューティ比が不均一になり易く、光損傷が低出力の第2高調波光に対して生じる。

【0213】耐光損傷性に関する検討により、光導波路の周辺部の耐光損傷性が、光導波路の特性に影響を与えることが明らかになった。装荷型光導波路では、導波路側面にプロトン交換層を有するため、埋め込み型光導波路の約10倍の耐光損傷強度を持っている。しかし、装荷型光導波路の底面は、通常の埋め込み型光導波路と同様の構造となっている。

【0214】そこで、図24に示す構造を形成する。図24の(a)は、光波長変換素子の斜視図であり、

(b)は断面図である。具体的には、プロトン交換層を多層構造にし、導波層である第1のプロトン交換層805の底面にプロトン濃度の薄い第2のプロトン交換層815を形成する。図24の構成は、プロトン交換層が上記のように多層構造になっている以外は、図9を参照して説明した構成と同じである。対応する構成要素には対応する類似した参照番号を付しており、その説明を省略する。

【0215】導波層である第1のプロトン交換層805の底面に第2のプロトン交換層815を設けて電気伝導度を高めることで、光導波路の底部を電気伝導度の高い層で覆って、耐光損傷性をより高めることができる。これにより、耐光損傷性は、装荷型光導波路の2倍以上になる。

【0216】また、本願発明者らの検討により、光損傷強度が分極反転周期にも依存することが明らかになった。周期状の分極反転構造により光励起による電界を相殺する効果があることは既に述べたが、分極反転周期が粗くなると、この効果が薄れてきて光損傷が生じ易くな

る。具体的には、分極反転周期が約4 μ m以下で、耐光損傷性が顕著に増大する。周期約8 μ m以下でも、基板に対して2倍以上の耐光損傷性の向上が確認できた。しかし、反転周期が約10 μ m以上になると、分極反転による耐光損傷性の向上は確認できなかった。

【0217】(第9の実施形態) 前述した実施形態では、高屈折率の導波層を形成する方法として、ピロ磷酸中で基板を熱処理することによりLiTaO₃基板中のLi⁺と酸中のH⁺とを交換し、基板表面に高屈折率のプロトン交換層を形成していた。以下では、プロトン交換法にさらなる改良を加え、低損失で且つ光損傷に強い光導波路を形成する方法を提供する。

【0218】ピロ磷酸は、高温での解離定数が大きく、液中での濃度むらが生じ難いために、ピロ磷酸を用いるプロトン交換処理では、屈折率及び厚みの均一な低損失のプロトン交換層が形成できる。しかし、基板中のLiイオンとプロトンの交換量が大きいため、基板表面に化学損傷を与え、基板の非線形定数を極端に劣化させる。そこで、ピロ磷酸を用いたプロトン交換によるプロトン交換量の制御性について検討した。

【0219】ピロ磷酸のプロトン交換量を制御する方法として、酸を中和して解離定数を低減する方法がある。そこで、磷酸Li塩をピロ磷酸中に加えて、プロトン交換特性の変化を観測した。しかし、磷酸Liをピロ磷酸の10倍以上加えても、プロトン交換特性(交換速度、屈折率)の変化は見られなかった。また、磷酸Liを加えると、溶液の粘度が増して作業性が極端に悪くなる結果となった。

【0220】そこで、基板表面にプロトン透過膜を設けてプロトン交換を行う方法を提案する。

【0221】図25(a)及び(b)に、本実施形態の光導波路の製造方法の工程図を示す。まず、図25(a)に示すように、スパッタ蒸着によりLiTaO₃基板901の+C面にTa₂O₅膜(透過膜)902を堆積する。次に、基板901をピロ磷酸中で熱処理する。Ta₂O₅膜902を透過してプロトン交換を行うことにより、図25(b)に示すように、Ta₂O₅膜902とLiTaO₃基板901との間に、プロトン交換層903を形成する。このようなTa₂O₅膜902を介したプロトン交換では、プロトン交換速度や濃度の制御が可能となる。

【0222】図26は、Ta₂O₅膜902の厚さとプロトン交換の拡散定数の関係を示した特性要因図である。約260℃でプロトン交換処理を行う場合、拡散定数は、Ta₂O₅膜の厚さがそれぞれ0nm、100nm及び400nmであるときに、それぞれ0.227 μ m²/h、0.05 μ m²/h、及び0.0132 μ m²/hとなる。これは、プロトン交換速度がTa₂O₅膜の厚さにより制御されていることを示している。

【0223】形成されたプロトン交換層を評価したところ、化学損傷が非常に小さく、光導波路の伝搬損失が1



／2以下に低減できることが見いだされた。さらに、耐光損傷強度が2倍以上に向上し、特性の優れた光導波路が形成されていることが確認された。

【0224】また、プロトン交換濃度を下げること、プロトン交換層の非線形性を向上させることができる。プロトン交換を行うと、 LiTaO_3 や LiNbO_3 等の材料にはプロトン交換層が形成され、ステップ状の高屈折率層が形成される。プロトン交換層は、交換濃度が高くなると、非線形性が基板の半分以上に劣化することが知られている。非線形性を回復するには、プロトン交換層をアニール処理してプロトン交換濃度を下げることがあるが、アニール処理を行うとプロトン交換層が熱拡散により広がり、屈折率分布がステップ状からグレーディッド状に変化してしまう。このため、光波長変換素子等へ応用する場合には、導波モードの電界分布形状のコントロールが難しくなり、変換効率低下の原因になっていた。しかし、 Ta_2O_5 膜を透過膜として用いることでプロトン濃度分布の制御が可能となるので、ステップ形状の屈折率分布を有する高非線形性を保った光導波路の形成が可能となる。

【0225】非線形性の劣化を防ぐ Ta_2O_5 膜の厚さとしては、最低でも約500nm以上必要である。この方法を用いて光波長変換素子を形成することにより、変換効率の大幅な向上が可能となる。

【0226】また、図26に示すように、 Ta_2O_5 膜の厚さが約100nm以下になると、膜厚に対する拡散定数の変化が大きくなり、プロトン交換の深さを制御するために Ta_2O_5 膜の厚さの精密なコントロールが必要となつて、実質的に制御が難しくなる。さらに、 Ta_2O_5 膜の厚さが約50nm以下では、化学損傷の低減効果が少ない。一方、 Ta_2O_5 膜の厚さが増大すると、拡散定数が低下し、プロトン交換時間が長くなって生産性が悪くなる。

【0227】このため、 Ta_2O_5 膜の厚さは、約1 μm 以下が適当である。すなわち、高非線形導波路を形成するには約500nm～約1000nmの厚さの透過膜(Ta_2O_5 膜)が必要であり、プロトン交換速度の制御を行うには、約50nm～約100nm程度が適当である。

【0228】さらに、 Ta_2O_5 透過膜とプロトン交換選択マスクを組み合わせることで、プロトン交換形状を大幅に変化させることが可能となり、導波モードの電界分布の制御が可能となる。

【0229】具体的には、まず図27(a)に示すように、 LiTaO_3 基板910の+C面に、厚さ約60nmのTa膜911で、ストライプ状のマスクパターン911を形成する。次に、図27(b)に示すように、マスクパターン911の上に厚さ約400nmの Ta_2O_5 層912を堆積する。さらに、ピロ磷酸中で熱処理して、 Ta_2O_5 層912を介したプロトン交換処理を行う。このとき、図27(c)に示すように、Taマスクパターン911によ

って覆われていない部分のみに、ストライプ状のプロトン交換層913が形成される。プロトン交換処理は、約260℃で約4時間行う。

【0230】図28(a)及び(b)には、プロトン交換プロファイルの断面図を示す。図28(a)は、 Ta_2O_5 透過膜が無い場合であり、(b)は、厚さ約400nmの Ta_2O_5 透過膜912を介してプロトン交換を行った場合である。図28(b)に示すように Ta_2O_5 透過膜912を設けることにより、Taマスク911のエッジ部分のみでプロトン交換が進み、中央部分では拡散速度が遅くなる。そのため、プロトン交換層913の深さが、両サイドで深くなる。これは、Taマスク911のエッジ部分では Ta_2O_5 透過膜912が薄くなるため、この部分のプロトン交換速度が速くなるためと考えられる。

【0231】このようなプロトン交換処理によって形成された光導波路では、2ピークを有する2次伝搬モードを選択的に励起することが可能となり、2ピークの光出力を取り出せる。これより、光コンピュータ、作動検出用の計測装置、光ディスクの検出における位置修正用の検出光として、2ビームの出力を利用できる。また、光分波器に応用することにより、導波光を2つの導波路に効率よく分波できる。

【0232】また、プロトン交換速度の Ta_2O_5 透過膜の厚さへの依存性を利用して、プロトン交換プロファイルの制御が可能となる。通常は、厚さの異なるプロトン交換層を1ウェハ上に形成するには、適切なパターンのプロトン交換マスクを形成して部分的にプロトン交換を行う工程を、繰り返す必要がある。しかし、 Ta_2O_5 透過膜を用いることで、厚さの異なるプロトン交換層を1回のプロトン交換工程で同時に形成することが可能となる。例えば、図29に示すように、Taマスクパターン911とともに使用する Ta_2O_5 透過膜912の厚さを部分的に変えることにより、1回のプロトン交換処理で厚さの異なる複数のプロトン交換層913を基板910に形成できる。さらに、 Ta_2O_5 透過膜912の厚さをテーパー状に変化させることにより、深さがテーパー状に変化したプロトン交換層の形成も可能となる。

【0233】以上の方法を用いれば、プロトン交換層の分布を自由に変わることができて、プロセスの簡素化が行える。

【0234】次に、長時間にわたるプロトン交換が可能な、耐酸性に優れたマスクについて説明する。

【0235】 LiTaO_3 、 LiNbO_3 などに深いプロトン交換層を形成するには、長時間のプロトン交換が必要である。例えば、 LiTaO_3 に約2 μm 以上の深さのプロトン交換層を形成するには、一般に約260℃で約4時間以上のプロトン交換処理が必要となる。ところが、上記のようにして選択的なプロトン交換を行うには、高温で長時間のプロトン処理に耐えるマスクが必要となる。しかし、従来技術によれば、耐酸性に優れたTaマスクを用いても、

1時間以上のプロトン交換は難しい。

【0236】これに対して本願発明者らは、金属膜上に酸化膜を堆積することで、長時間のプロトン交換が可能な耐酸性に優れたマスクが得られることを見出した。具体的には、Ta膜を約60nm堆積した後に、その表面にTa₂O₅透過膜を厚さ約400nm堆積する。これによって、プロトン交換を4時間以上行ってもマスクは十分な耐プロトン性を示し、マスクの下基板は全くプロトン交換されていないことが確認された。このように、金属マスク上に酸化膜を堆積することにより、耐酸性に優れたプロトン交換マスクが実現できた。

【0237】なお、本実施形態では透過膜としてTa₂O₅を用いているが、他にNb₂O₅、SiO₂、TiO₂、Al₂O₃、LiNbO₃、LiTaO₃などの耐酸性に優れた酸化膜を用いれば、同様の効果が得られる。

【0238】(第10の実施形態)次に、本発明の第10～15の実施形態による光導波路及び光波長変換素子の製造方法における、エッチング速度について説明する。

【0239】加工が困難で溶剤に腐食され難い構造的及び化学的に安定な基板、例えば石英等は、ウェットエッチング、ドライエッチング、反応性イオンエッチング等のエッチング手段を用いても、高精度にエッチングすることは困難である。このような基板は、エッチングにおいてレジストパターンとの選択比が小さく、微細な形状をエッチングする場合には、深いエッチング形状を形成することが困難である。

【0240】これに対して、本発明の以下の光導波路及び光波長変換素子の製造方法においては、エッチングする部分のみを選択的にイオン交換することにより基板の特性を変えて、エッチング速度を向上させている。例えば、LiNbO₃、LiTaO₃等の基板を酸中で熱処理すると、結晶中のLi原子とプロトン(+H)が交換されて、プロトン交換層が形成される。プロトン交換層では原子間の結合が元の結晶に比べて弱くなっており、エッチングされ易い状態となっている。この結果、プロトン交換層は、ウェットエッチング、ドライエッチング、反応性イオンエッチング等により、容易にエッチングされる。したがって、本発明の光導波路及び光波長変換素子の製造方法においては、エッチングする部分のみに選択的にイオン交換を施し、この部分をエッチングすることにより、選択比の高い高精度のエッチング処理が可能となる。このため、本発明の製造方法によれば、均一な品質を有する光導波路及び光波長変換素子の形成が可能となる。

【0241】次に、導波方向に直交するように一定周期毎に分極反転構造を有する光波長変換素子の製造方法における、導波路の表面に発生する凹凸について説明する。

【0242】従来の製造方法においては、光導波路の表面はエッチングにより凹凸が形成されて、光の伝搬損失

が大きい。この理由は、光導波路の表面における分極反転部分と非反転部分で結晶面が異なるため、エッチング速度に違いが生じるためである。しかし、このような周期的な分極反転構造を有する面に対してイオン交換処理を施すと、そのイオン交換部分においては、周期的に分極反転構造を有する面であっても凹凸が発生しないことが発見された。そこで、エッチングする部分のみに選択的にイオン交換処理を行った後にエッチングすることにより、光導波路表面の凹凸をなくし、光の伝搬損失の少ない高効率の光導波路を有する光波長変換素子の製造が可能となる。

【0243】次に、本発明の製造方法により作製された光導波路及び光波長変換素子における光損傷について説明する。

【0244】従来の埋め込み型光導波路では、光導波路を伝搬する光の電界分布が、光導波路より外部へ染みだしている。このため、強い光が導波路を伝搬した場合、導波路の外周部分において、光損傷(光があたることにより物質の屈折率が変化する現象)が生じる。しかし、本発明の製造方法により作製されたリッジ型の光導波路においては、光導波路の表面にリッジ型の導波層が形成されているため、光の電界分布の染みだしが小さくなる。この結果、本発明による光導波路は、光損傷に対し強い構造となる。

【0245】また、光損傷による屈折率変化は、光の照射により結晶中の不純物から電荷が発生し、結晶内部に電界を生じることにより誘起される。しかし、導波路近傍にイオン交換部分を形成すると、このイオン交換部分において電気伝導度が高くなり、内部電界の発生を抑圧することが可能となる。そこで、本発明の製造方法により形成された構造では、光導波路の表面にリッジ型のイオン交換層を形成しているため、光損傷の発生が抑圧される。

【0246】次に、本発明の光波長変換素子における電界分布の重なりについて説明する。

【0247】光波長変換素子において、基本波と第2高調波の電界分布の重なりが変換効率に大きく影響する。本発明による光波長変換素子においては、光導波路の表面にリッジが形成されているために屈折率分布がステップ状となり、従来の埋め込み型光導波路に比べて、基本波と第2高調波の重なりを大きくすることができる。さらに、光導波路の表面近傍にイオン濃度の高い層が形成されているため、深さ方向の電界の重なりも大きくなり、本発明による光波長変換素子は、高い変換効率を有する。

【0248】図30(a)～(f)は、本発明の第10の実施形態における光導波路の製造方法を示す図であり、それぞれ、光の導波方向と直交する面にそった断面図である。

【0249】まず、図30(a)に示すように、非線形



光学物質であるC板のLiTaO₃単結晶基板1001（結晶のC軸に垂直な面で切り出した基板、以下では、「基板1001」と略称する）を、約200℃～約300℃のピロ磷酸液中に数分間浸してプロトン交換を行い、基板1001の表面に帯板状の1次プロトン交換層1002を形成する。

【0250】次に、基板1001に対して約400℃～約450℃でアニール処理を行い、1次プロトン交換層1002の全部を、図30（b）に示すように帯板状のアニール処理プロトン交換層1006にする。

【0251】次に、基板1001の表面である+C面上に、厚さ約60nmのTa層をスパッタリング又は蒸着により堆積させる。その後、フォトリソグラフィ法とCF₄雰囲気中のドライエッチングによって、所定幅の直線状のTa層1003を形成する。

【0252】さらに、Ta層1003を保護マスクとして非マスク部分を再度プロトン交換し、図30（d）に示すように、アニール処理プロトン交換層1006の表面から所定の深さでの2次プロトン交換層1005を形成する。

【0253】次に、基板1001の表面にネガレジスト（不図示）を塗布した後に、裏面より紫外線を照射してネガレジストを露光して現像し、図30（e）に示すように直線状のTaマスク1003の上にレジストパターン1004を形成する。このとき、直線状のTa層1003が保護マスクとなって非マスク部分のみ露光されるため、Ta層1003の上のみに、所定幅を有した直線状のレジストパターン1004が、選択的に形成される。

【0254】次に、形成されたレジストパターン1004とTa層1003を保護マスクとしてCHF₃雰囲気中でドライエッチングを行い、非マスク部分の2次プロトン交換層1005をエッチングで除去する。さらに、基板1001をフッ酸：硝酸＝1：2の液中に数秒間浸して、残留するTa層1003及びレジストパターン1004を除去する。その後、光導波路の入出射面となる両端面を光学研磨して、図30（f）に示すようなリッジ1007を有する光導波路が製造される。

【0255】なお、リッジ1007の側面には、プロトン交換部分1008が形成されている。プロトン交換部分1008は、Ta層1003の保護マスクを用いて2次プロトン交換層1005を形成する際に、プロトンの横方向への拡散により形成される。このプロトン交換部分1008はアニールされていないため、アニール処理されたプロトン交換層1006に比べてプロトン濃度が高く、屈折率変化も大きくなっている。

【0256】上記の製造方法におけるエッチングについて説明する。

【0257】上記の製造方法において、エッチング部分のみがTa層1003を保護マスクとして選択的にプロトン交換されるため、エッチング速度は従来に比べて飛躍

的に向上しており、また、プロトン交換部分のみが確実にエッチングされるため、導波部分にプロトン交換による影響を全く与えることがない。

【0258】

【表3】

基板	エッチング速度	レジストとの選択比
LiTaO ₃	4nm/min	0.2
プロトン交換後 アニール処理した LiTaO ₃	4nm/min	0.2
プロトン交換した LiTaO ₃	20nm/min	1

【0259】表3は、LiTaO₃におけるCHF₃雰囲気中でのエッチング速度を比較したデータであり、各種エッチング対象基板のエッチング速度、及びレジストパターンに対する選択比を示している。ここで選択比は、プロトン交換したLiTaO₃基板の値によって規格化した値を示している。表3におけるエッチング対象基板は、LiTaO₃基板、プロトン交換した後にアニール処理したLiTaO₃基板、及びプロトン交換したLiTaO₃基板の3種類である。

【0260】表3に示すように、LiTaO₃基板をプロトン交換処理することにより、他の基板に比べてレジストパターンに対して高い選択比（5倍）がとれる。このため、プロトン交換したLiTaO₃基板では、他の基板に比べて微細かつ深い形状を形成するエッチングが可能となる。

【0261】次に、上記の製造方法において、プロトン交換を用いることによりエッチングの深さを高精度に制御できることを説明する。

【0262】一般的なドライエッチング装置においては、エッチングの厚み制御は±数%の誤差を有する。このため、このようなドライエッチング装置を用いて光導波路を製造する場合には、光導波路の特性がばらつくという問題がある。しかし、本発明に係る上記の光導波路の製造方法を用いることにより、エッチング深さは高精度に制御可能である。その理由を以下に記載する。

【0263】上記の表3に示したように、エッチング速度は、プロトン交換部分とアニールしたプロトン交換部分とで大きく異なっている。このため、本発明の製造方法において、プロトン交換層のエッチングが終了してアニール処理部分に達すると、エッチングの速度は急速に低下し、実質的にエッチングは停止状態となる。従って、エッチング深さは、プロトン交換層の深さとほぼ一致する。また、プロトン交換層の深さは、±1%以下の精度で制御することか可能である。このため、エッチング深さの制御は、プロトン交換層の深さの制御と同等の



±1%以下の制御が可能である。

【0264】さらに、プロトン交換したLiTaO₃基板はレジストパターンに対して高い選択比を有しているため、エッチング時に、レジストパターンの形状は確実に保持されている。このため、本発明の製造方法において、プロトン交換していないLiTaO₃基板をエッチングする場合に比べ、プロトン交換したLiTaO₃基板では、より垂直に近いエッチング形状が得られる。

【0265】次に、上記の製造方法におけるセルフアライメントについて説明する。

【0266】上記の製造方法において、直線状のTa層1003が、2次プロトン交換層1005を形成するための保護マスク、及びネガレジストを露光するためのマスクの両方を兼用している。このため、Ta層1003は、エッチング部分のみを選択的にプロトン交換するための保護マスクとして機能するとともに、レジストパターン1004を裏面から露光してTa層1003の上のみに確実に形成させるためのマスクとしても、機能している。この結果、レジストパターン1004はセルフアライメントでTa層1003の上に正確に形成できるため、上記の製造方法によれば、プロトン交換部分のみを正確にエッチングすることが可能である。この結果、光導波路の均一化及び低損失化を達成することができるので、上記の光導波路の製造方法は、再現性及び量産性に優れた特徴を有している。また、セルフアライメントにより金属マスク上のみに確実にレジストパターンを形成できるため、製造が容易であり、且つ大量生産が可能である。

【0267】次に、上記の製造方法により製造された光導波路の特性評価実験について説明する。

【0268】図31は、上記の製造方法により作製された光導波路を示す断面図である。図30(a)～(f)と同じ構成要素には、同じ参照番号を付している、この光導波路に、波長約860nmの光を伝搬させて特性評価実験を行った。具体的には、光導波路に波長約860nmの半導体レーザの光をレンズを用いて結合させ、導波する光の近視野像を光導波路の出射端面より計測した。この計測結果によれば、上記の光導波路は、リッジ1007の側面のプロトン交換部分1008により強い閉じ込めが可能となり、入射したレーザ光に対する光導波路内に閉じ込められる光の分布は、従来技術の構造に比べて数%向上していた。さらに、この光導波路には、幅方向にステップ状の屈折率分布が形成されていることが明らかになった。

【0269】次に、上記特性評価実験における各特性の測定結果について説明する。

【0270】最初に、形成された光導波路の伝搬特性について説明する。

【0271】導波する光の伝搬損失の測定値は約2dB/cmであって、比較的低損失の光導波路が形成された。この値は、LiTaO₃基板自身を直接にエッチングした

場合の約1/2の値であり、上記の製造方法によって低損失の光導波路が形成されることが理解できる。

【0272】次に、形成された光導波路の非線形性に関する測定結果について説明する。

【0273】LiTaO₃基板がプロトン交換されると非線形光学定数や電気光学定数などが大きく悪化し、プロトン交換したLiTaO₃基板を有する光導波路を非線形光学素子及び電気光学素子等に適用する際の大きな問題となっていた。しかし、プロトン交換したLiTaO₃基板の光導波路をさらに高温でアニール処理することにより、プロトン濃度が低下し、各定数も通常のLiTaO₃基板と同等の値まで回復することが確認された。

【0274】本実施形態の製造方法により製造した光導波路の非線形光学定数の測定結果より、この光導波路は、アニールしたLiTaO₃基板の光導波路とほぼ等しい値の非線形光学定数を有していることを確認できた。この理由は、2次プロトン交換層1005が、エッチングにより除去されて光導波路に影響を与えない部分に選択的に形成されるためである。実際にはリッジ1007の側面に僅かにプロトン交換部分1008が存在するが、光導波路の内部にはプロトン濃度の高い部分が存在しないために、高い非線形特性を維持することができる。

【0275】次に、形成される光導波路の導波損失特性における測定結果について説明する。

【0276】リッジ型光導波路の導波損失の原因は、リッジ形状をエッチングした際にその表面に生じる僅かな凸凹である。特に、導波路部分(屈折率:約2.2)と空気層(屈折率:1.0)との間の屈折率差が大きいため、光導波路の表面に凹凸が存在すると、導波損失が大きくなる。この影響を低減するためには、光導波路全体を、空気層より屈折率の高い物質で被う必要がある。

【0277】そこで、上記で形成されたリッジ型光導波路の全体を空気層の屈折率より高い物質の膜で被覆した際の、被覆膜の屈折率と導波損失との関係を測定した。図32に、その測定結果を示す。図32に示すように、屈折率が1.0より増加すると共に導波損失が低下する。しかし、被覆膜の屈折率が導波路の屈折率を超えると、導波路に光が閉じ込められなくなり、基本波はカットオフされる。このため、被覆膜は、空気層の屈折率(1.0)より大きく且つ光導波路の屈折率(約2.2)より小さい屈折率を有する光透過性材料から形成されることが好ましい。

【0278】なお、上記の説明では、LiTaO₃単結晶基板を用いているが、LiNbO₃の単結晶基板、或いは、LiTaO₃とLiNbO₃との多結晶基板(LiNb_{1-x}Ta_xO₃(0≤x≤1))でも、上記と同様の効果を得られる。LiNbO₃は電気光学定数及び非線形光学定数などが大きいので、多くの分野における光導波路素子(光スイッチ、非線形光学素子、音響光学素子等)に応用されている。したがって、本実施形態の光導波路及び光波長変換素子の製造方

法は、これらの応用分野において非常に有効である。

【0279】さらに、 LiTaO_3 基板の代わりに、 MgO を添加した $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ 基板や $\text{MgO}:\text{LiTaO}_3$ 基板にも適用できる。これらの材料により形成された基板は光損傷に強いいため、高出力の素子が作製できて有効である。

【0280】さらに、基板としては、KTP基板を用いることもできる。KTPを基板材料とした場合には、イオン交換としてRbイオン交換が用いられて、上記と同様の効果を有する光導波路が形成できる。KTPは耐光損傷性に優れた特性を有しているため、KTP基板の光導波路は、高出力の光導波路として有効である。

【0281】(第11の実施形態)図33(a)～(f)は、本発明の第11の実施形態における光導波路の製造方法を示す図であり、それぞれ、光の導波方向と直交する面にそった断面図である。

【0282】まず、図33(a)に示すように、非線形光学物質であるC板の LiTaO_3 単結晶基板1101(結晶のC軸に垂直な面で切り出した基板、以下では、「基板1101」と略称する)を、約200℃～約300℃のピロ磷酸液中に数分間浸してプロトン交換を行い、基板1101の表面に帯板状の1次プロトン交換層1102を形成する。

【0283】次に、基板1101に対して約400℃～約450℃でアニール処理を行い、1次プロトン交換層1102の全部を、図33(b)に示すように帯板状のアニール処理プロトン交換層1106にする。

【0284】次に、基板を再度ピロ磷酸中で熱処理して、図33(c)に示すように、アニール処理プロトン交換層1106の表面から所定の深さまでの2次プロトン交換層1105を形成する。

【0285】さらに、図33(d)に示すように、2次プロトン交換層1105の上にフォトリソグラフィ法により所定幅の直線状レジストパターン1104を形成する。

【0286】そして、形成されたレジストパターン1104を保護マスクとして用いて、 CHF_3 雰囲気中でドライエッチングを行い、図33(e)に示すように、非マスク部分の2次プロトン交換層1105をエッチングで除去する。

【0287】その後、図33(f)に示すように、残留する直線状の2次プロトン交換層1105の上のレジストパターン1104を除去する。

【0288】さらに光導波路の入出射面となる両端面を光学研磨して、図面と直交する方向に光が導波する光導波路が製造される。なお、上記の工程で形成されたアニール処理プロトン交換層1106は、典型的にはその深さが約2.5 μm であり、最終工程で残存した2次プロトン交換層1105によって形成されるリッジの高さは、典型的には約0.4 μm である。

【0289】上記の製造方法によれば、製造工程が簡便

なためにリッジ型光導波路を容易に製造することができる。また、上記の製造方法では、エッチングする部分に2次プロトン交換層1105を形成することによって、前述のようにエッチング部のみの特性を変えて、エッチング速度を飛躍的に向上させている。さらに、エッチングの深さは2次プロトン交換層1105の深さと実質的に一致するため、2次プロトン交換層1105の深さを精度高く形成することにより、エッチング深さを所望の深さに制御できる。このため、本実施形態の製造方法によれば、高い精度でリッジを形成できて品質のそろった光導波路が製造できるとともに、プロトン交換部分が光導波路に悪影響を与えることがほとんど無く、リッジにのみプロトン交換部分を有する光導波路を形成することができる。さらに、本実施形態の製造方法によれば、リッジにはプロトン交換濃度の高い高屈折率層が形成されているため、閉じ込めの強い光導波路が形成できる。

【0290】さらに、本実施形態の光導波路は、その表面にプロトン濃度の高い部分が形成されているため、優れた耐光損傷性を有する。これは、プロトン濃度の高い部分が基板に比べて高い電気伝導度を有しているため、光損傷の原因となる光励起による自由電荷の偏りに伴う電界の発生が抑圧されるためである。

【0291】また、光導波路の表面にプロトン濃度の高い部分が形成されているため、光導波路の特性の経時変化が抑圧されている。すなわち、 LiNbO_3 や LiTaO_3 のアニール処理プロトン交換層においては、屈折率の経時変化が発生するが、本実施形態によれば、さらにプロトン交換を行うことにより、そのような屈折率変化は抑圧される。これは、アニール処理プロトン交換層ではその表面近傍の結晶構造がアニール処理後に徐々に変化することに対して、その表面部分に再度プロトン交換を施すことにより、その部分の結晶構造が変化するためである。

【0292】なお、上記の説明では、 LiTaO_3 単結晶基板を用いているが、 LiNbO_3 の単結晶基板、或いは、 LiTaO_3 と LiNbO_3 との多結晶基板($\text{LiNb}_{1-x}\text{Ta}_x\text{O}_3$ (0 $\leq x\leq 1$))でも、上記と同様の効果を得られる。 LiNbO_3 は電気光学定数及び非線形光学定数などが大きいので、多くの分野における光導波路素子(光スイッチ、非線形光学素子、音響光学素子等)に応用されている。したがって、本実施形態の光導波路及び光波長変換素子の製造方法は、これらの応用分野において非常に有効である。

【0293】さらに、 LiTaO_3 基板の代わりに、 MgO を添加した $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ 基板や $\text{MgO}:\text{LiTaO}_3$ 基板にも適用できる。これらの材料により形成された基板は光損傷に強いいため、高出力の素子が作製できて有効である。

【0294】さらに、基板としては、KTP基板を用いることもできる。KTPを基板材料とした場合には、イオン交換としてRbイオン交換が用いられて、上記と同様の効果を有する光導波路が形成できる。KTPは耐光損傷性に優れた特性を有しているため、KTP基板の光導波路

は、高出力の光導波路として有効である。

【0295】さらに、上記では光導波路にプロトン交換導波路を用いているが、他に、Ti、Cu、Nd、Cd、Zなどの金属拡散導波路も適用できる。これらの金属拡散導波路は、非線形定数や電気光学定数の劣化が少ないために、優れた特性を有する光学素子が製造できる。

【0296】(第12の実施形態)図34(a)～(g)は、本発明の第10の実施形態で説明した光導波路の製造方法を利用した光波長変換素子の製造方法を示す図であり、それぞれ、光の導波方向と直交する面にそった断面図である。

【0297】まず、図34(a)に示すように、非線形光学物質であるC板のLiTaO₃単結晶基板1201(結晶のC軸に垂直な面で切り出した基板、以下では、「基板1201」と略称する)を、約200℃～約300℃のピロ磷酸液中に数分間浸してプロトン交換を行い、基板1201の表面に帯板状の1次プロトン交換層1202を形成する。

【0298】次に、基板1201に対して約400℃～約450℃でアニール処理を行い、1次プロトン交換層1202の全部を、図34(b)に示すように帯板状のアニール処理プロトン交換層1206にする。

【0299】次に、基板1201の表面である+C面上に楕形電極1209aを設け、基板1201の裏面である-C面には平面電極1209bを形成する。このように取付けられた両電極間に電圧を印加して、図34

(c)に示すように、光導波方向に直交する分極反転層1210が形成される。この分極反転層1210は、楕形電極1209aの形状に応じた一定周期毎に形成される。

【0300】さらに、両電極を取り除いた後に、基板1201の+C面上に、厚さ約60nmのTa層をスパッタリング又は蒸着により堆積させる。その後、フォトリソグラフィ法とCF₄雰囲気中のドライエッチングによって、図34(d)に示すような所定幅の直線状のTa層1203を形成する。

【0301】さらに、Ta層1203を保護マスクとして非マスク部分を再度プロトン交換し、図34(e)に示すように、アニール処理プロトン交換層1206の表面から所定の深さでの2次プロトン交換層1205を形成する。

【0302】次に、基板1201の表面にネガレジスト(不図示)を塗布した後に、裏面より紫外線を照射してネガレジストを露光して現像し、図34(f)に示すように直線状のTaマスク1203の上にレジストパターン1204を形成する。このとき、直線状のTa層1203が保護マスクとなって非マスク部分のみ露光されるため、Ta層1203の上のみに、所定幅を有した直線状のレジストパターン1204が、選択的に形成される。

【0303】次に、形成されたレジストパターン1204とTa層1203を保護マスクとしてCHF₃雰囲気中でドライエッチングを行い、図34(g)に示すように、非マスク部分の2次プロトン交換層1205をエッチングで除去する。さらに、基板1201をフッ酸：硝酸＝1：2の液中に数秒間浸して、残留するTa層1203及びレジストパターン1204を除去する。その後に、光導波路の入出射面となる両端面を光学研磨して、図34(g)に示すようなリッジ1207を有する光導波路が製造される。

【0304】なお、リッジ1207の側面には、プロトン交換部分1208が形成されている。プロトン交換部分1208は、Ta層1203の保護マスクを用いて2次プロトン交換層1205を形成する際に、プロトンの横方向への拡散により形成される。このプロトン交換部分1208はアニールされていないため、アニール処理されたプロトン交換層1206に比べてプロトン濃度が高く、屈折率変化も大きくなっている。

【0305】本実施形態の製造方法においては、帯板状の光導波路を形成した後に分極反転層1210が形成されるため、分極反転層1210は光導波路形成時の製造工程により影響されることがない。従って、均一な分極反転層1210を確実に形成ができる。

【0306】通常は、分極反転層をエッチングすると、非分極反転層と分極反転層間でエッチング速度に違いがあるために光導波路の表面に凹凸が形成される。しかし、本実施形態の製造方法では、エッチングすべき分極反転層1210を有する表面には2次プロトン交換層1205が形成されているため、分極反転層1210の表面にエッチングによる凹凸が形成されない。この結果、本実施形態の製造方法は、低損失の光波長変換素子を形成するのに適した製造方法である。

【0307】さらに、上記の製造方法によれば、2次プロトン交換層1205の深さの制御により、エッチングの深さを精度高く制御できるため、特性のそろった光波長変換素子の製造が可能である。

【0308】次に、本実施形態の製造方法により製造された光波長変換素子の原理について説明する。図35は、本実施形態の製造方法により製造された光波長変換素子の構造を示す斜視図である。図34(a)～(g)と同じ構成要素には同じ参照番号を付しており、その説明は省略する。

【0309】図35の光波長変換素子は、擬似位相整合型の第2高調波発生素子であり、光導波路内の光の伝搬の方向に周期的に形成された分極反転層1210により、光導波路を伝搬する基本波が半分の波長の第2高調波に変換される。例えば、波長860nmの赤外光をこの光導波路に入射すれば、半分の波長の430nmの青色光が射出される。光波長変換素子の特性は、光導波路の非線形光学定数、及び光導波路を伝搬する基本波と第



2高調波との電界の重なりに大きく依存している。

【0310】次に、上記の製造方法により製造された光波長変換素子の特性評価結果について説明する。

【0311】最初に、リッジ型の光導波路を有する光波長変換素子の導波モード（基本波と第2高調波）の重なりについて説明する。

【0312】本実施形態の光波長変換素子の評価実験において、光導波路を伝搬する導波光の近視野像を観測して、導波光の電界分布の横方向（図35におけるX方向）の重なりを求めた。図36（a）及び（b）は、基本波光及び第2高調波光の光導波路における強度分布を示すグラフであり、図36（a）は従来の埋め込み型導波路の場合を示し、図36（b）は本実施形態のリッジ型光導波路の場合を示している。これらのグラフより、横方向の重なりは、従来の埋め込み型光導波路の強度分布に比べて、本実施形態のリッジ型光導波路で非常に大きくなっていることが分かる。この理由は、リッジ型光導波路の屈折率分布がリッジ1207によってステップ状になるとともに、リッジ1207の側面に形成されたプロトン交換部分1208が高屈折率部となって、光導波路の閉じ込めに大きく貢献しているためである。この結果、リッジ型光導波路を用いた本実施形態の光波長変換素子では、従来の埋め込み型光導波路を用いた光波長変換素子に比べて、変換効率が1.5倍に向上した。

【0313】次に、本実施形態で製造された光波長変換素子における耐光損傷性について説明する。

【0314】光導波路における光損傷は、光導波路等の光の閉じ込めの強い場所で発生しやすい。また、このような光損傷の発生は、光の波長が短い程、顕著になる。従来の光波長変換素子においては、第2高調波の発生により光損傷が生じて、出力特性が不安定になる。そこで、従来の埋め込み型光導波路においては、耐光損傷性に優れるとともに基板に比較して大きな耐光損傷強度を有するプロトン交換した LiTaO_3 が用いられていた。しかし、従来の埋め込み型光導波路では、導波する光がプロトン交換領域以外の部分へも染み出すため、導波路の外周部で光損傷が生じて、結果として高出力の第2高調波を発生させることは困難であった。

【0315】これに対して、本実施形態の製造方法により製造された光波長変換素子について耐光損傷性の評価実験を行ったところ、従来の埋め込み型光導波路を用いた光波長変換素子の10倍以上の耐光損傷性を有していた。その理由は、リッジ型光導波路を用いた光波長変換素子は、光導波路の表面にリッジ形状のプロトン交換層を形成して、光導波路からの光の染みだしを抑制しているためである。また、プロトン交換層は電気伝導度が高いため、光損傷の原因となる光励起自由電子の偏りによる電界の発生を抑圧している。このため、本実施形態の波長変換素子では、導波路の表面に形成されたリッジ形状のプロトン交換層により、耐光損傷性に優れた導波路

構造が実現されている。さらに、本実施形態の光波長変換素子では、リッジ1207の側面に形成されたプロトン交換部分1208が高いプロトン濃度を有して電気伝導度を高めているため、この点でも耐光損傷性が向上している。

【0316】次に、本実施形態の光波長変換素子の変換効率について説明する。

【0317】リッジ型光導波路において、リッジ1207の側面に微細な凹凸が形成されると導波損失が大きくなる。このような導波損失を低減するために、前述の第10の実施形態では、空気層の屈折率より高く且つ光導波路の屈折率より低い膜で、光導波路を覆う。このような被膜は、本実施形態の波長変換素子についても有効である。

【0318】また、本実施形態の光波長変換素子では、リッジ型光導波路を用いることにより、光導波路における横方向の伝搬光の重なりを大きくすることが可能になっている。しかし、光導波路における深さ方向（図35におけるZ方向）の光の強度分布の重なりはあまり改善されておらず、高効率の光導波路を有する光波長変換素子を形成するためには、その深さ方向の重なりを大きくする必要が有る。そこで、深さ方向の導波光の強度分布を制御する方法として、光導波路のリッジ1207の表面に高屈折率層を形成する（すなわち、リッジ1207の表面のみを選択的に屈折率の高い層で覆う）。このように高屈折率の膜をリッジ1207の表面に形成することにより、光導波路の深さ方向の閉じこめを強くして、導波モード間の重なりを大きくすることができる。

【0319】図37（a）及び（b）は、光波長変換素子における基本波と第2高調波の深さ方向の重なり状態を示した状態図であり、（a）は前述の本実施形態の製造方法により製造された光波長変換素子における導波モード間の重なり状態を示し、（b）は、リッジ1207の表面にさらに高屈折率層1220を形成した光波長変換素子における導波モード間の重なり状態を示す。

【0320】図37（b）に示した光波長変換素子で、リッジ1207の表面上のみに選択的に形成した高屈折率層1220は、アモルファス状の LiNbO_3 である。光導波路の閉じ込めを強くするには、光導波路の屈折率より高い屈折率を持つ膜を、リッジ1207の表面上に形成することが有効である。このため、 LiTaO_3 の光導波路の屈折率（約2.15）よりも大きい屈折率（約2.25）を有するアモルファス状の LiNbO_3 を、高屈折率層1220の構成材料として用いている。高屈折率層1220の厚さは、光導波路を伝搬する第2高調波がこの高屈折率層1220を導波しない程度の厚さ、例えば約100nm～約500nmとする。この理由は、第2高調波が LiNbO_3 の表面層を導波すると、この表面層に第2高調波が閉じ込められ、変換効率が大幅に低下してしまうためである。図37（b）に示すように、 LiNbO_3 の高屈折率



層1220を有する光波長変換素子では、深さ方向の導波光における基本波と第2高調波間の強度分布の重なりが大きいために、図37(a)に示した光波長変換素子に比べて変換効率が1.3倍向上した。

【0321】なお、上記の説明では、 LiTaO_3 単結晶基板を用いているが、 LiNbO_3 の単結晶基板、或いは、 LiTaO_3 と LiNbO_3 との多結晶基板($\text{LiNb}_{1-x}\text{Ta}_x\text{O}_3$ ($0 \leq x \leq 1$))でも、上記と同様の効果を得られる。 LiNbO_3 は電気光学定数及び非線形光学定数などが大きいので、多くの分野における光導波路素子(光スイッチ、非線形光学素子、音響光学素子等)に応用されている。したがって、本実施形態の光導波路及び光波長変換素子の製造方法は、これらの応用分野において非常に有効である。

【0322】さらに、 LiTaO_3 基板の代わりに、 MgO を添加した $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ 基板や $\text{MgO}:\text{LiTaO}_3$ 基板にも適用できる。これらの材料により形成された基板は光損傷に強いので、高出力の素子が作製できて有効である。

【0323】さらに、基板としては、KTP基板を用いることもできる。KTPを基板材料とした場合には、イオン交換としてRbイオン交換が用いられて、上記と同様の効果を有する光導波路が形成できる。KTPは耐光損傷性に優れた特性を有しているため、KTP基板の光導波路は、高出力の光導波路として有効である。

【0324】さらに、基板としては、他に ZnS 、 GaAs などの半導体基板を用いることもできる。半導体材料は大きな非線形光学定数を有し、製造技術も発達しているため、高出力の光波長変換素子が作製できる。

【0325】さらに、上記では光導波路にプロトン交換導波路を用いているが、他に、 Ti 、 Cu 、 Nd 、 Cd 、 Z などの金属拡散導波路も適用できる。これらの金属拡散導波路は、非線形定数や電気光学定数の劣化が少ないために、優れた特性を有する光学素子が製造できる。

【0326】(第13の実施形態)図38(a)～

(f)は、本発明の第11の実施形態で説明した光導波路の製造方法を利用した光波長変換素子の製造方法を示す図であり、それぞれ、光の導波方向と直交する面にした断面図である。

【0327】まず、図38(a)に示すように、非線形光学物質であるC板の LiTaO_3 単結晶基板1301(結晶のC軸に垂直な面で切り出した基板、以下では、「基板1301」と略称する)を、約200℃～約300℃のピロ磷酸液中に数分間浸してプロトン交換を行い、基板1301の表面に帯板状の1次プロトン交換層1302を形成する。

【0328】次に、基板1301に対して約400℃～約450℃でアニール処理を行い、1次プロトン交換層1302の全部を、図38(b)に示すように帯板状のアニール処理プロトン交換層1306にする。

【0329】次に、基板を再度ピロ磷酸中で熱処理し

て、図38(c)に示すように、アニール処理プロトン交換層1306の表面から所定の深さまでの2次プロトン交換層1305を形成する。

【0330】次に、基板1301の表面である+C面上に櫛形電極1309aを設け、基板1301の裏面である-C面には平面電極1309bを形成する。このように取付けられた両電極間に電圧を印加して、図38

(d)に示すように、光導波方向に直交する分極反転層1310が形成される。この分極反転層1310は、櫛形電極1309aの形状に応じた一定周期毎に形成される。

【0331】さらに、両電極を取り除いた後に、さらに、図38(e)に示すように、基板1301の上にフォトリソグラフィ法により所定幅の直線状レジストパターン1304を形成する。

【0332】そして、形成されたレジストパターン1304を保護マスクとして用いて、 CHF_3 雰囲気中でドライエッチングを行い、非マスク部分の2次プロトン交換層1305をエッチングで除去する。その後、図38

(f)に示すように、残留する直線状の2次プロトン交換層1305の上のレジストパターン1304を除去する。さらに光導波路の入出射面となる両端面を光学研磨して、光波長変換素子が製造される。なお、上記の工程で形成されたアニール処理プロトン交換層1106は、典型的にはその深さが約2.5μmであり、最終工程で残存した2次プロトン交換層1305によって形成されるリッジの高さは、典型的には約0.4μmである。

【0333】上記の本実施形態の光波長変換素子の製造方法では、簡便な製造工程で、リッジ型光導波路を有する光波長変換素子を容易に製造できる。さらに、形成される光波長変換素子は、そのリッジがプロトン濃度が高く屈折率変化の大きな2次プロトン交換層1305に設けられているため、光の閉じ込めの強い導波路構造が実現される。

【0334】さらに、上記の製造方法によれば、2次プロトン交換層1305の深さの制御により、エッチングの深さを精度高く制御できるため、特性のそろった光波長変換素子の製造が可能である。

【0335】次に、上記の製造方法により製造された光波長変換素子の特性評価結果について説明する。

【0336】図39は、本実施形態の製造方法により製造された光波長変換素子の構造を示す斜視図である。図38(a)～(f)と同じ構成要素には同じ参照番号を付している。具体的には、基板1301の上に、アニール処理プロトン交換層1306が形成されている。このアニール処理プロトン交換層1306の上には、リッジ1307であるプロトン交換部分1380が形成されている。また、光の導波方向と直交するように、一定周期毎に分極反転層1310が形成されている。プロトン交換部分1380は、プロトン交換時に形成されたプロト

ン濃度の高い2次プロトン交換層1305の一部分である。

【0337】上記の構成を有する光波長変換素子は、リッジ1307として屈折率の高いプロトン交換層1305を有するため、深さ方向の導波モード間（基本波と第2高調波）の電界分布の重なりが大きく、高効率の光波長変換素子となっている。以下に、その理由を述べる。

【0338】図40は、リッジの厚さと光波長変換素子の交換効率との関係を示したグラフである。図40の（a）、（b）及び（c）は、リッジの高さの異なる3種類の光波長変換素子における各導波モード間（基本波と第2高調波）の厚さ方向の重なりを示している。

【0339】図40の（a）に示す光波長変換素子では、リッジ1307が非常に薄く、実質的には表面に高屈折率層が存在しない。この場合には、導波路の屈折率分布がグレーデッド状（中心部の屈折率が高く、外周部分の屈折率が低い状態）になり、基本波と第2高調波の重なりが小さくて、交換効率が低い。

【0340】図40の（b）に示す光波長変換素子では、やや厚いリッジ1307が設けられている。このような表面における高屈折率層により、基本波の強度分布が表面近傍に引き寄せられ、基本波と第2高調波の重なりが増大して、高い交換効率を得られる。具体的には、図40の（b）に示す光波長変換素子の交換効率は、リッジに高屈折率層を形成しない場合に比べて約1.5倍に増大しており、交換効率の高効率化を達成するためにはリッジに高屈折率層を形成することが有効な手段であることが、明らかである。

【0341】図40の（c）に示す光波長変換素子では、さらに厚い高屈折率層が設けられて、基本波と第2高調波の重なりが増大している。このとき、基本波及び第2高調波は、いずれも、表面の高屈折率層ではカットオフされている。しかし、図40の（c）の光波長変換素子では、第2高調波が高屈折率層を導波するので、交換効率は逆に低下している。この理由は、高屈折率層におけるプロトン濃度が高く非線形光学定数が劣化しているために、この高屈折率層では高効率の波長変換が生じないからである。

【0342】従って、高効率の光波長変換素子を構成するためには、リッジの厚さを第2高調波のみがカットオフとなる程度にするのが望ましい。

【0343】さらに、本実施形態の光波長変換素子では、光導波路の表面にプロトン濃度の高い部分が形成されているため、優れた耐光損傷性を有する。これは、プロトン濃度の高い部分が基板に比べて高い電気伝導度を有しているので、光損傷の原因となる光励起による自由電荷の偏りに伴う電界の発生が抑圧されるためである。

【0344】また、光導波路の表面にプロトン濃度の高い部分が形成されているため、光導波路の特性の経時変化が抑圧されている。すなわち、 LiNbO_3 や LiTaO_3 のアニ

ール処理プロトン交換層においては、屈折率の経時変化が発生するが、本実施形態によれば、さらにプロトン交換を行うことにより、そのような屈折率変化は抑圧される。これは、アニール処理プロトン交換層ではその表面近傍の結晶構造がアニール処理後に徐々に変化するのに対して、その表面部分に再度プロトン交換を施すことにより、その部分の結晶構造が変化するためである。

【0345】なお、上記の説明では、 LiTaO_3 単結晶基板を用いているが、 LiNbO_3 の単結晶基板、或いは、 LiTaO_3 と LiNbO_3 との多結晶基板（ $\text{LiNb}_{1-x}\text{Ta}_x\text{O}_3$ （ $0 \leq x \leq 1$ ））でも、上記と同様の効果を得られる。 LiNbO_3 は電気光学定数及び非線形光学定数などが大きいので、多くの分野における光導波路素子（光スイッチ、非線形光学素子、音響光学素子等）に応用されている。したがって、本実施形態の光導波路及び光波長変換素子の製造方法は、これらの応用分野において非常に有効である。

【0346】さらに、 LiTaO_3 基板の代わりに、 MgO を添加した $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ 基板や $\text{MgO}:\text{LiTaO}_3$ 基板にも適用できる。これらの材料により形成された基板は光損傷に強いので、高出力の素子が作製できて有効である。

【0347】さらに、基板としては、KTP基板を用いることもできる。KTPを基板材料とした場合には、イオン交換としてRbイオン交換が用いられて、上記と同様の効果を有する光導波路が形成できる。KTPは耐光損傷性に優れた特性を有しているため、KTP基板の光導波路は、高出力の光導波路として有効である。

【0348】さらに、基板としては、他に ZnS 、 GaAs などの半導体基板を用いることもできる。半導体材料は大きな非線形光学定数を有し、製造技術も発達しているため、高出力の光波長変換素子が作製できる。

【0349】さらに、上記では光導波路にプロトン交換導波路を用いているが、他に、 Ti 、 Cu 、 Nd 、 Cd 、 Z などの金属拡散導波路も適用できる。これらの金属拡散導波路は、非線形定数や電気光学定数の劣化が少ないために、優れた特性を有する光学素子が製造できる。

【0350】なお、本発明における光導波路の構成は、例えばファイバ状の導波路に適用することもできる。その場合には、光学材料によって形成される円筒状コアが上記の説明における光導波路に相当し、そのコアの表面を覆うように、上述の特徴を有するクラッド層が形成されている。

【0351】

【発明の効果】以上に説明したように、光導波路上にクラッド層を設け、光導波路を伝搬する基本モードの基本波と一部がクラッド層を導波する高次モードの第2高調波との間で位相整合をとることにより、モード間のオーバーラップを高めて変換効率を大幅に向上することができるので、実用上、大きな効果が得られる。

【0352】また、屈折率の高い材料でクラッド層を形



成することにより、導波路の幅方向の閉じ込めも、強くすることができる。これによって、導波路から出射される光の出射角を幅方向と深さ方向でほぼ等しくすることができ、出射ビームのアスペクト比を改善し、光の利用効率を大幅に向上させることができる。これによって、実用上、大きな効果が得られる。

【0353】また、光波長変換素子において、高屈折率層と基板より屈折率を有するクラッド層とを設けることにより、光導波路を伝搬する光の閉じ込めを強くして、光のパワー密度を向上することができる。さらに、これによって、光導波路内を伝搬する基本波と高調波との電界分布のオーバーラップが増大するため、変換効率を大幅に向上することが可能となり、実用上、大きな効果が得られる。

【0354】また、本発明の光波長変換素子の構造により、光損傷による第2高調波出力の変動を大幅に低減することが可能となる。これにより、高出力で安定な第2高調波出力が得られるようになり、実用上、大きな効果が得られる。

【0355】さらに、本発明によれば、高屈折率のクラッド層により電界分布の制御が可能となるので、光導波路を伝搬するモードプロファイルの制御性が向上する。これによって、第2高調波出力の放射パターンのアスペクト比を1に近づけることが可能となり、光の利用効率が大幅に向上し、実用上、大きな効果が得られる。

【0356】さらに、光導波路の製造方法として、プロトン交換時に透過膜を通してプロトン交換を行うことにより、プロトン交換層表面の化学損傷を低減できる。これによって、導波損失の小さな光導波路が形成できて、実用上、大きな効果が得られる。

【0357】また、透過膜の厚さの制御によって形成されるプロトン交換層の厚さをコントロールすることができるため、1回のプロトン交換処理により異なった深さを有するプロトン交換層が形成できる。さらに、形成されるプロトン交換層の形状を透過膜の形状により制御できるため、作業の単純化、プロセス工程の削減による量産性の向上が可能となり、実用上、大きな効果が得られる。

【0358】さらに、本発明の光導波路及び光波長変換素子の製造方法では、金属マスクを用いてエッチング部分のみを選択的にプロトン交換し、さらに金属マスク上にレジストパターンを裏面露光により形成してエッチングすることにより、容易に光導波路を形成できる。また、上記製造工程において、エッチング部分をイオン交換にすることにより、エッチング速度及びエッチング精度の向上を達成することができ、品質のそろった光導波路の形成が可能となる。

【0359】さらに、製造された光導波路は、低損失で且つ耐光損傷性に優れ、導波路を伝搬する導波モードの電界分布の最適化が図られており、高効率且つ高出力の

光波長変換素子へ適用が可能である。

【0360】例えば、第10の実施形態の製造方法によれば、エッチングの深さを高精度に制御できるため、光導波路の均一化及び導波損失の低減化を達成することができる。第11の実施形態における製造方法では、リッジにプロトン交換濃度の高い高屈折率層を形成して、光の閉じ込めの強い素子を実現するとともに、耐光損傷性に優れた光導波路を容易に製造することができる。さらに、第12の実施形態によれば、光導波路表面にリッジを形成し、このリッジに高屈折率部分を形成することによって、高い変換効率を有し、且つ耐光損傷性に優れた光波長変換素子を得ることができる。また、第13の実施形態に示した製造方法によれば、エッチングの深さを高精度に制御できるため、均一な品質を有する光波長変換素子を容易に製造できるとともに、変換効率の高い光波長変換素子を得ることができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】(a)～(d)は、従来の埋め込み型光導波路の製造方法を説明するための断面図である。

【図2】(a)は、従来の光波長変換素子の構成の一例を示す斜視図であり、(b)は、(a)の線2B-2Bにおける断面図であり、(c)は、(a)の線2C-2Cにおける断面図である。

【図3】従来の光波長変換素子の構成の他の一例を示す斜視図である。

【図4】従来の光波長変換素子の構成のさらに他の一例を示す斜視図である。

【図5】(a)及び(b)は、光導波層の導波モードと分極反転層とのオーバーラップを模式的に示す図である。

【図6】(a)は、光導波路の模式的な断面図であり、(b)は、(a)の構成における導波モードの電界分布を表す図である。

【図7】(a)～(d)は、様々な構成の光導波路の模式的な断面図とそれぞれの構成における導波モードの電界分布を表す図である。

【図8】クラッド層及び光導波層における屈折率比と第2高調波強度比との関係を示す図である。

【図9】本発明の第1の実施形態における光波長変換素子の構成を示す図である。

【図10】基本波と第2高調波とのオーバーラップを表す図である。

【図11】(a)及び(b)は、それぞれクラッド層を有する光波長変換素子の構成を示す断面図であり、(c)及び(d)は、それぞれ(a)及び(b)の構成における導波光の電界強度分布を示す図である。

【図12】(a)～(d)は、本発明の第1の実施形態における光波長変換素子の製造工程を説明する断面図である。

【図13】 LiTaO_3 及び Nb_2O_5 の屈折率分散特性を表す図である。



【図14】導波光の波長及びクラッド層の厚さに対する、導波モードの特性を表す図である。

【図15】(a)～(c)は、異なる厚さのクラッド層に対する導波モードの電界分布を表す図である。

【図16】(a)～(d)は、光の伝搬状態（基本波及び第2高調波の導波モード）を説明するための図である。

【図17】クラッド層の屈折率と厚さとの関係を表す図である。

【図18】本発明の第2の実施形態における光波長変換素子の構成を示す図である。

【図19】本発明の第3の実施形態における光波長変換素子の構成を示す図である。

【図20】短波長光源の構成を示す図である。

【図21】光ピックアップの構成を示す図である。

【図22】(a)～(h)は、異なる材料から構成されたクラッド層が形成されている場合の導波モードの電界分布を説明するための図である。

【図23】本発明の第7の実施形態における光波長変換素子の構成を示す図である。

【図24】本発明の第8の実施形態における光波長変換素子の構成を示す図である。

【図25】(a)及び(b)は、本発明の第9の実施形態における光導波路の製造工程を説明する断面図である。

【図26】 Ta_2O_5 透過膜の厚さと拡散定数との関係を表す図である。

【図27】(a)～(c)は、本発明の第9の実施形態における光導波路の他の製造工程を説明する断面図である。

【図28】(a)及び(b)は、形成されるプロトン交換層の断面図である。

【図29】透過膜を用いるプロトン交換処理で形成されるプロトン交換層の他の断面図である。

【図30】(a)～(f)は、本発明の第10の実施形態における光導波路の製造工程を説明する断面図である。

【図31】光導波路の構成を示す断面図である。

【図32】図31の光導波路の表面に形成される層の屈折率と導波損失との関係を示す図である。

【図33】(a)～(f)は、本発明の第11の実施形態における光導波路の製造工程を説明する断面図である。

【図34】(a)～(g)は、本発明の第12の実施形態における光波長変換素子の製造工程を説明する断面図である。

【図35】光波長変換素子の構成を示す斜視図である。

【図36】(a)及び(b)は、光導波路を伝搬する光の横方向強度分布を示す図である。

【図37】(a)及び(b)は、光導波路を伝搬する光の深さ方向強度分布を示す図である。

【図38】(a)～(f)は、本発明の第13の実施形態における光波長変換素子の製造工程を説明する断面図である。

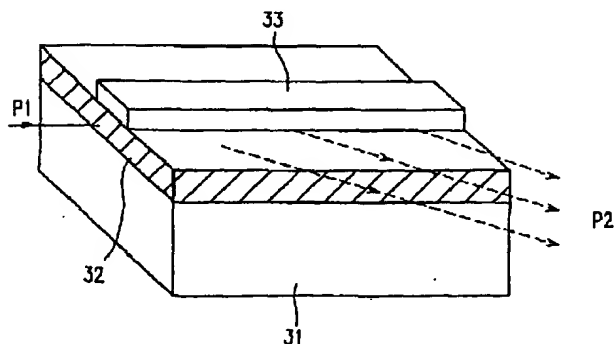
【図39】光波長変換素子の構成を示す斜視図である。

【図40】光波長変換素子におけるリッジの厚さと変換効率との関係を示す図である。

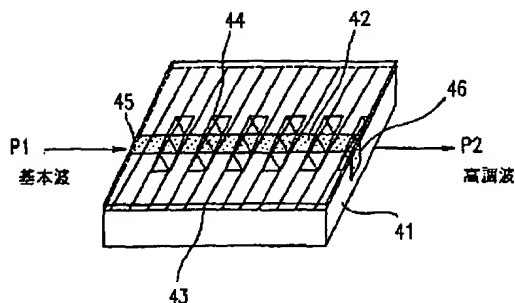
【符号の説明】

- 101 LiTaO₃基板
- 104 分極反転層
- 105 プロトン交換層
- 106 基本波光
- 107 第2高調波光
- 108 分極反転層の周期 Λ
- 109 分極反転層の幅W
- 110 クラッド層
- 111 カバー層

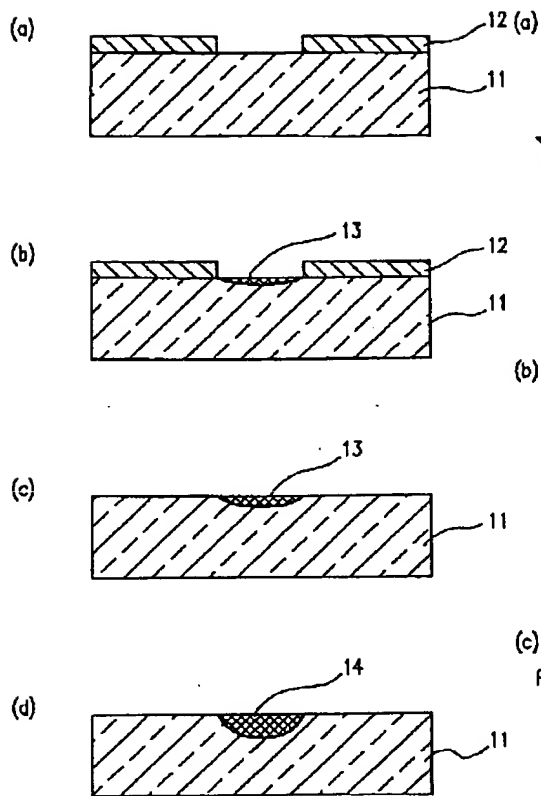
【図3】



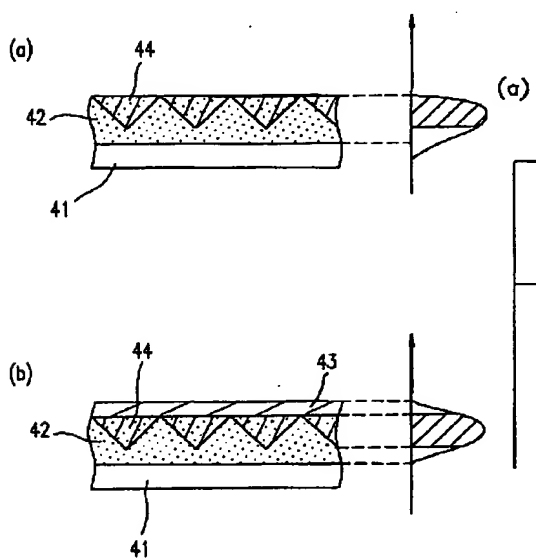
【図4】



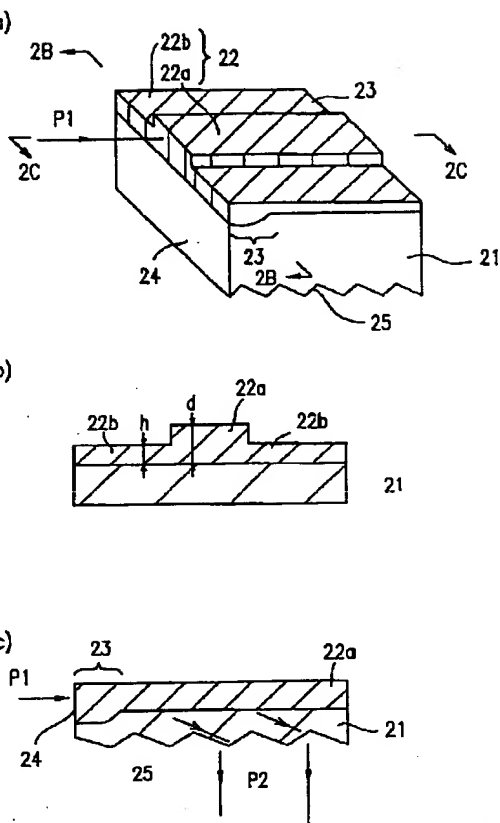
【図 1】



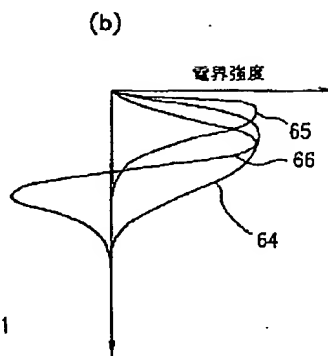
【図 5】



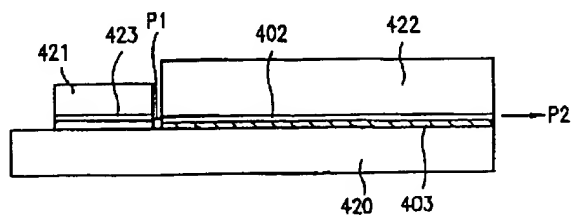
【図 2】



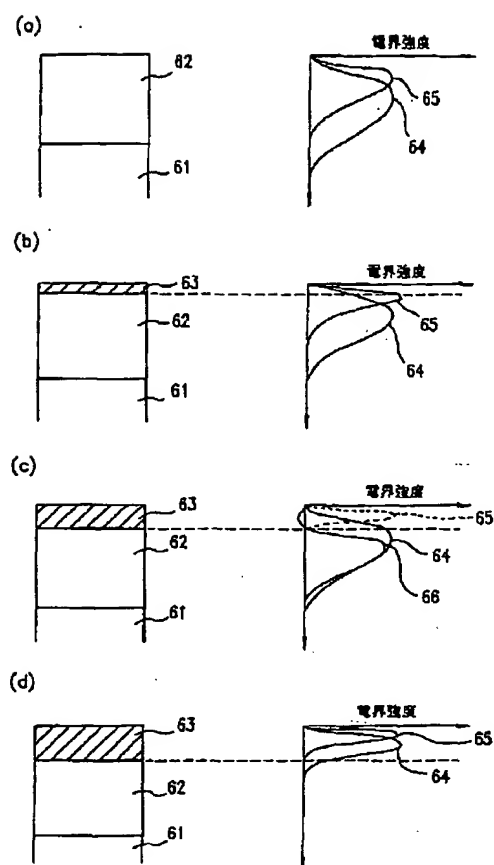
【図 6】



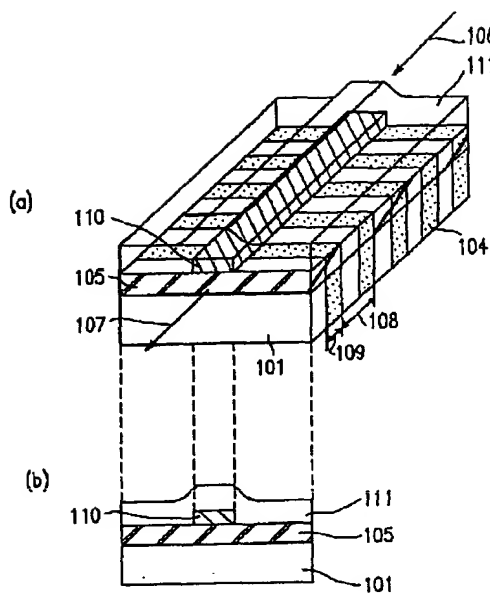
【図 20】



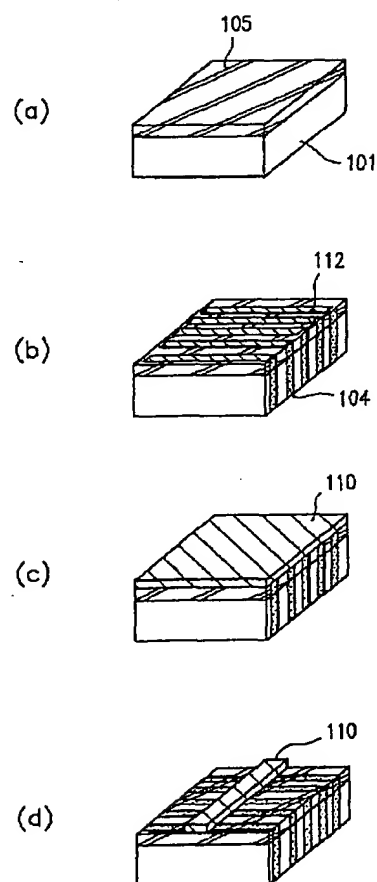
【図7】



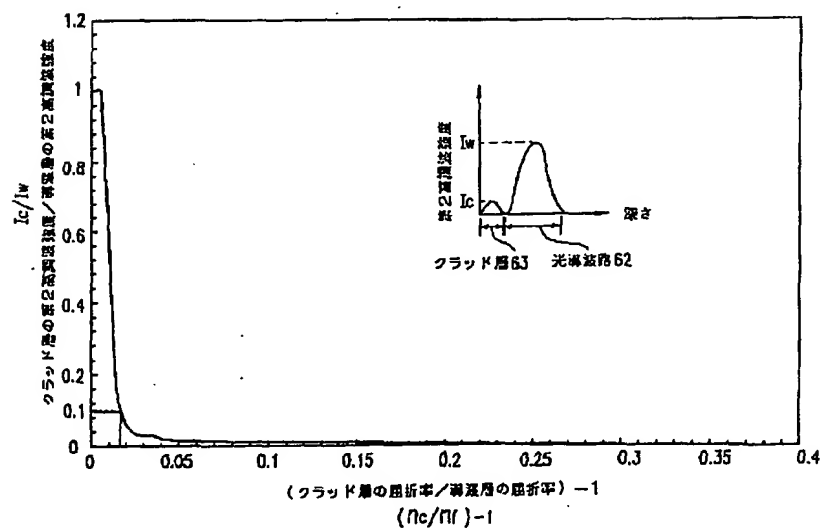
【図9】



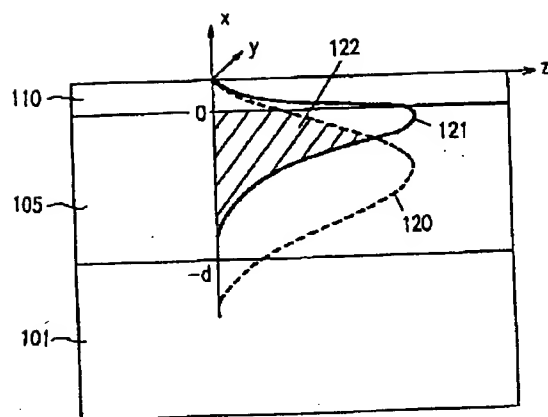
【図12】



【図8】



【図10】



$$\text{オーバーラップ} = \frac{\left(\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_w^2 E_{zw} dx dy \right)^2}{\left(\int_{-\infty}^{\infty} E_w^2 ds \right)^2 \left(\int_{-\infty}^{\infty} E_{zw}^2 ds \right)}$$

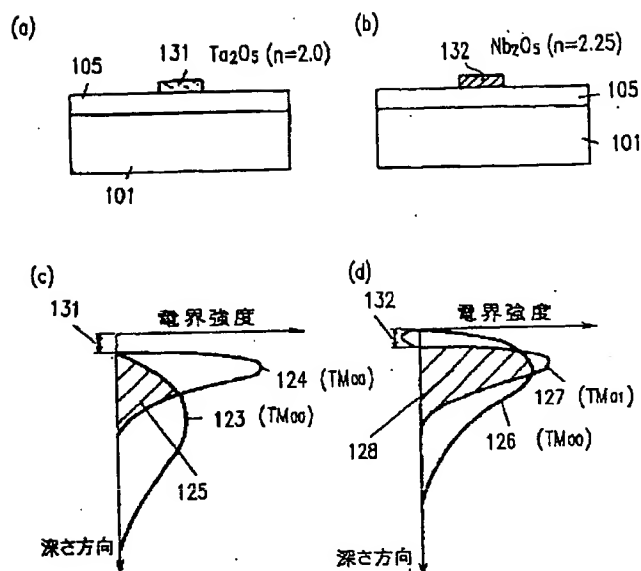
ただし

E_w : 基本波の電界

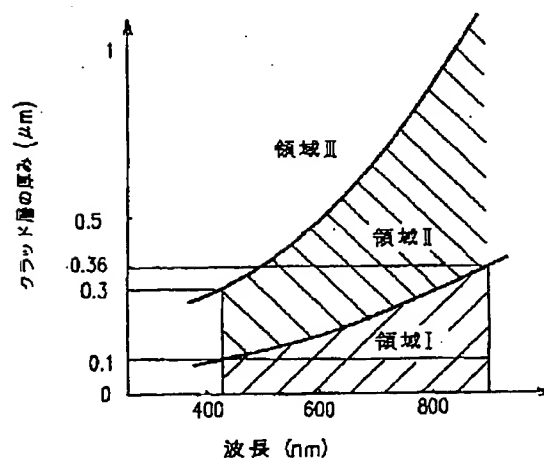
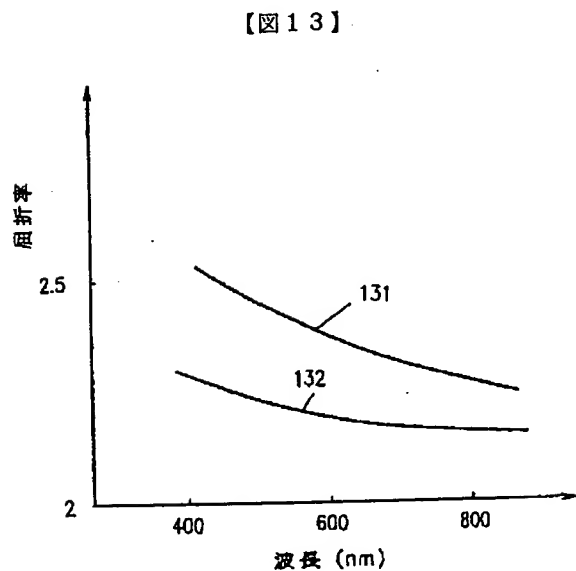
E_{zw} : SHGの電界

$ds = \int dx dy$: 導波路断面の面積積分

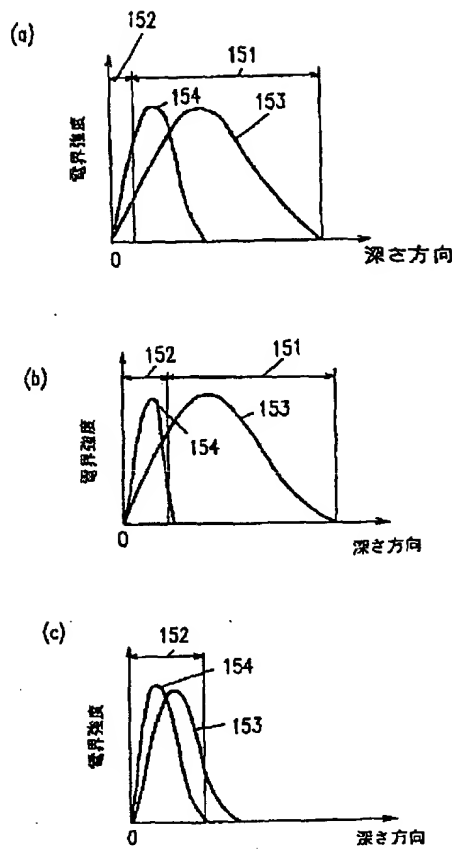
【図11】



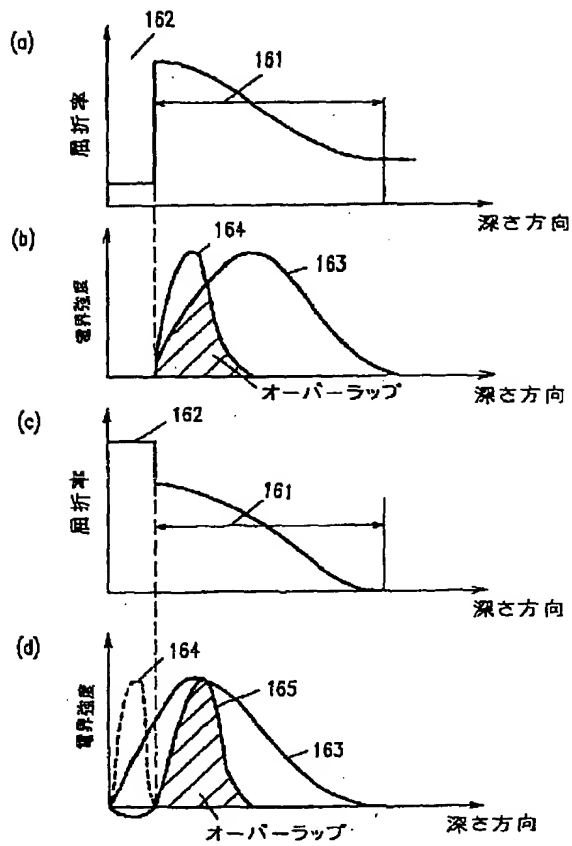
【図14】



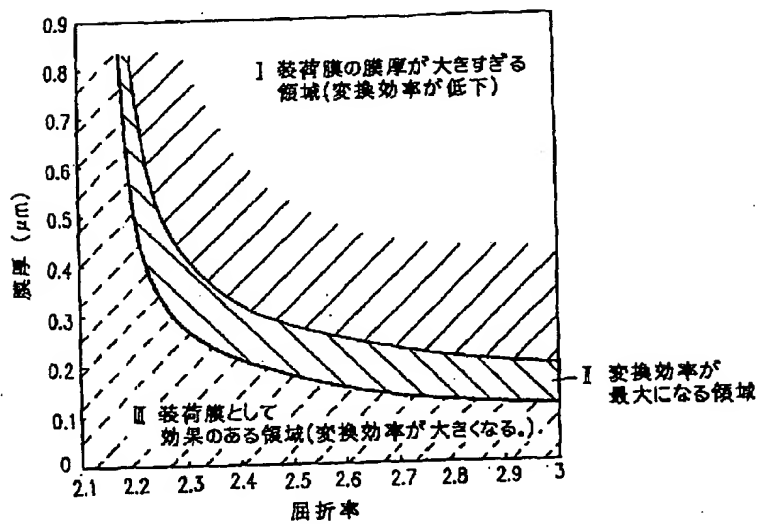
【図15】



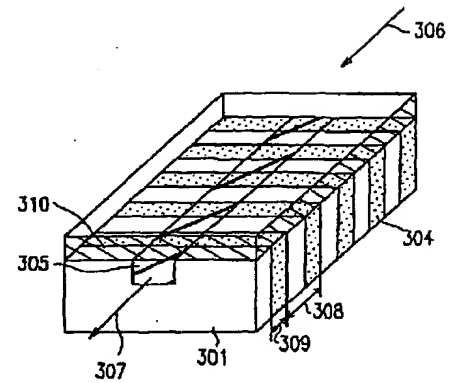
【図16】



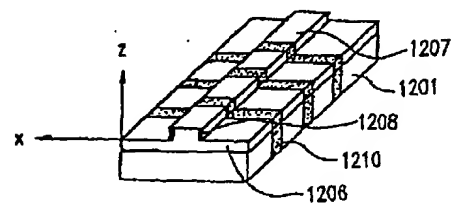
【図17】



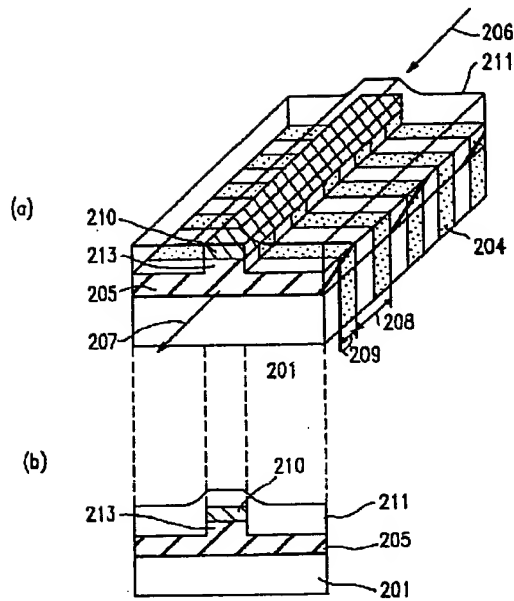
【図19】



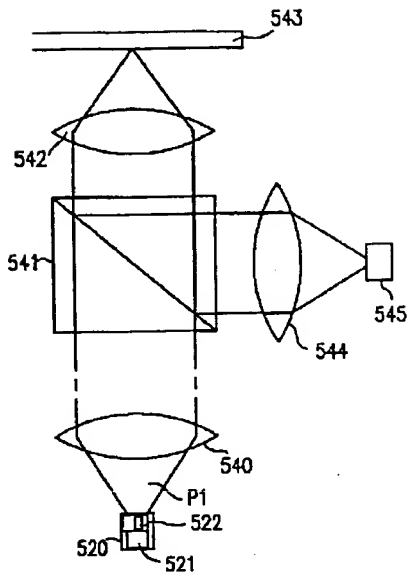
【図35】



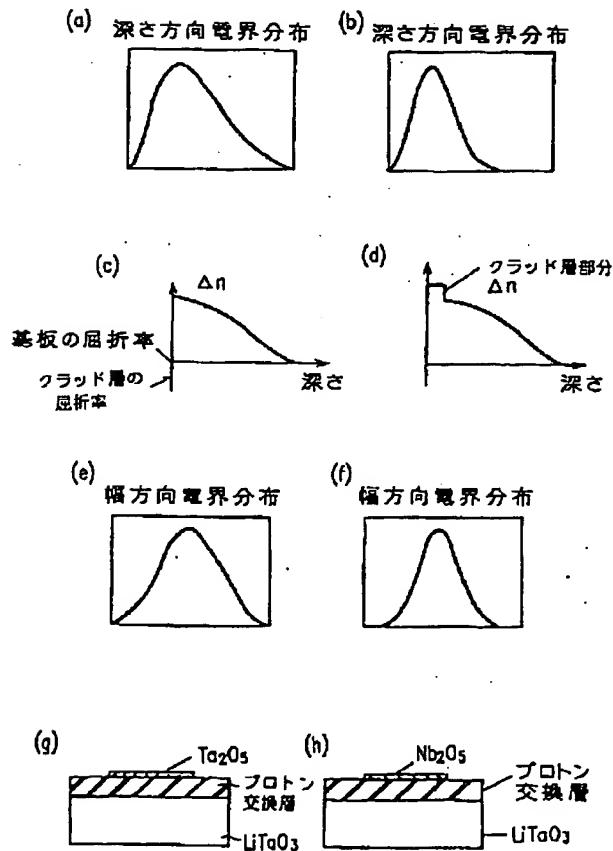
【図18】



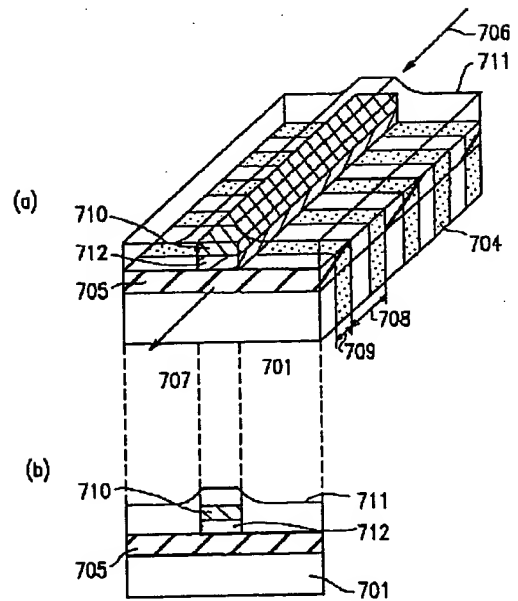
【図21】



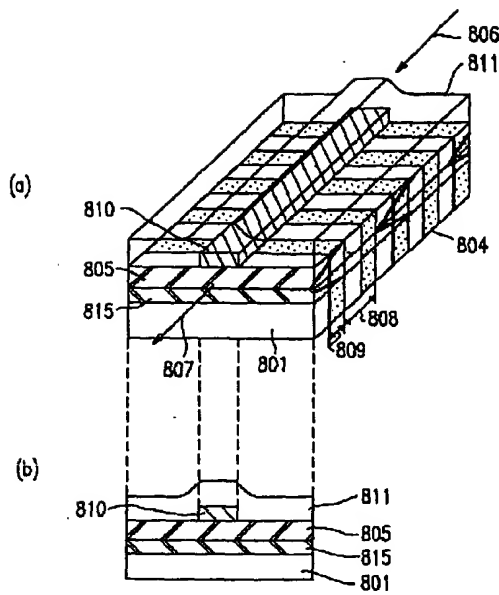
【図22】



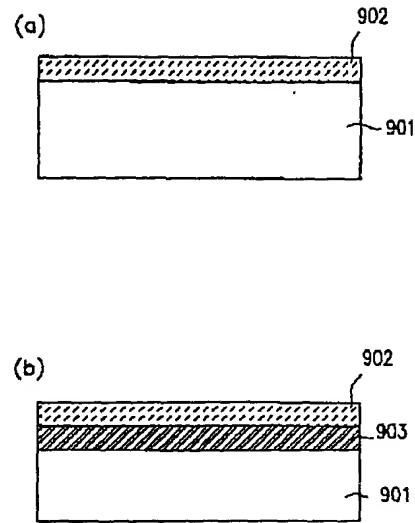
【図23】



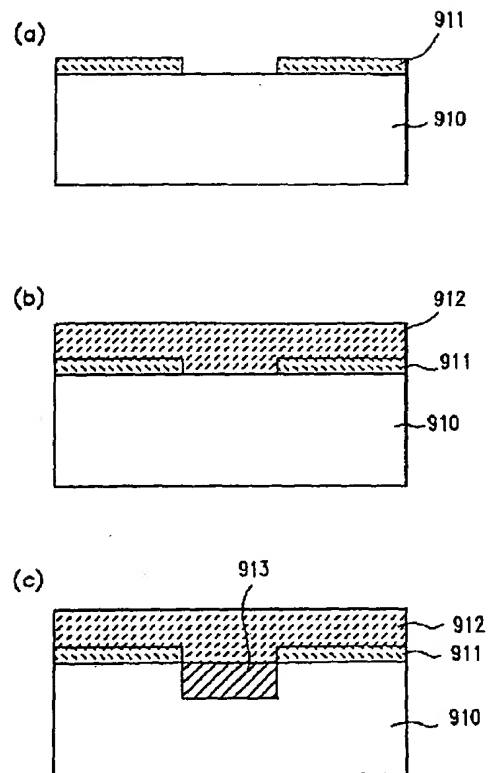
【図 2 4】



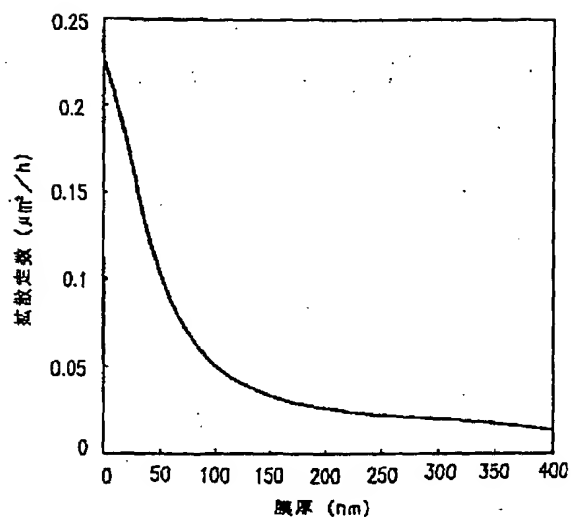
【図 2 5】



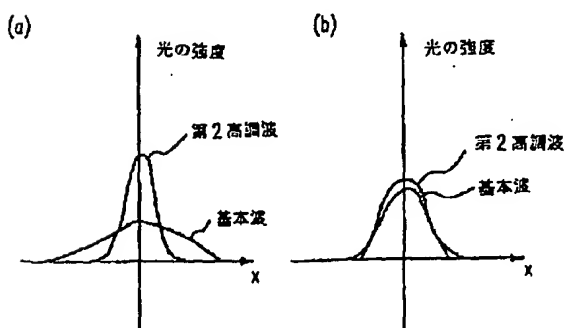
【図 2 7】



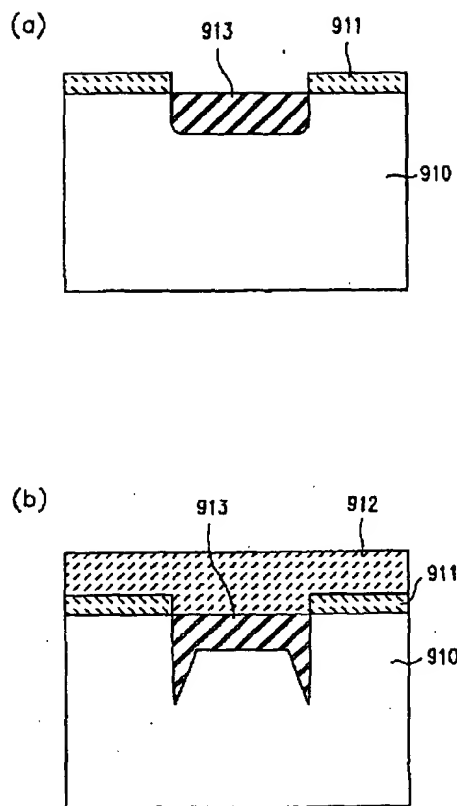
【図 2 6】



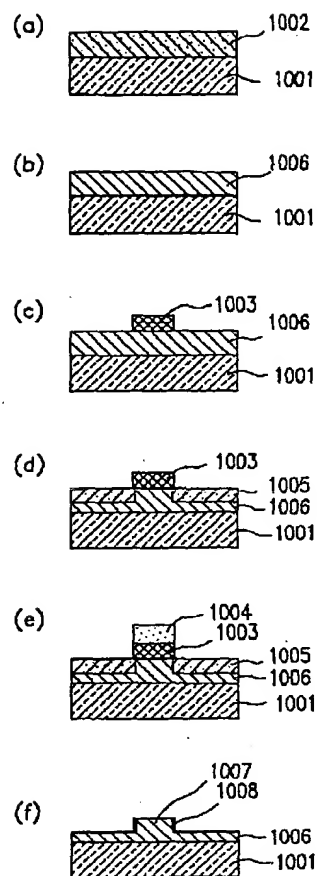
【図 3 6】



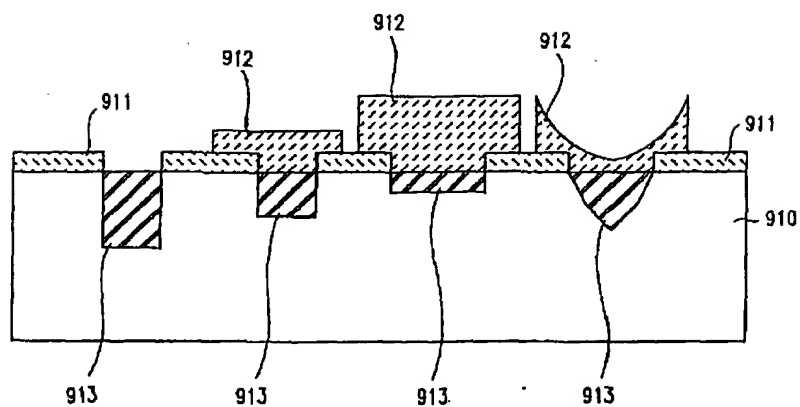
【図 28】



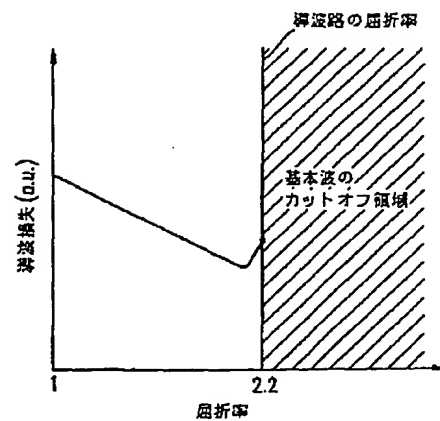
【図 30】



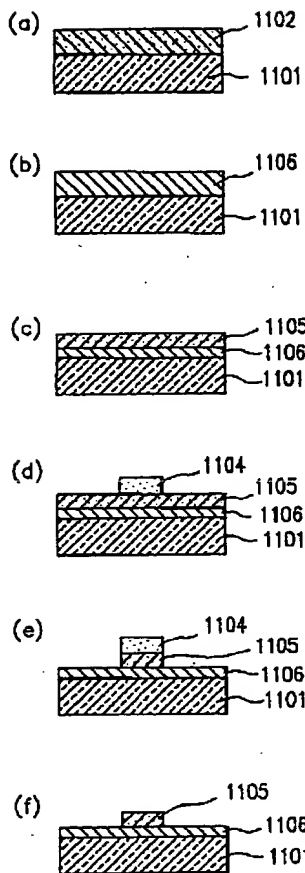
【図 29】



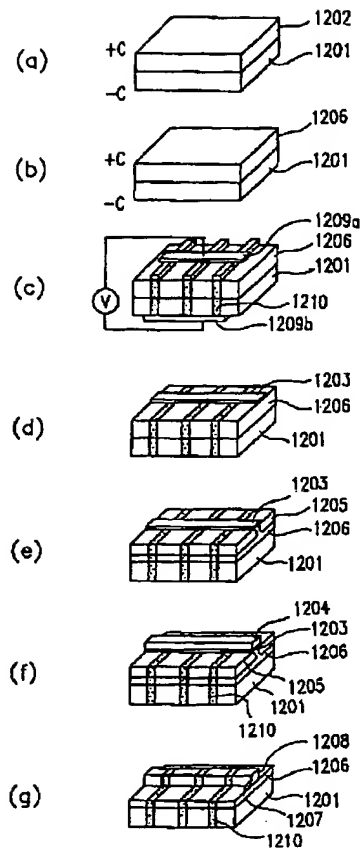
【図 32】



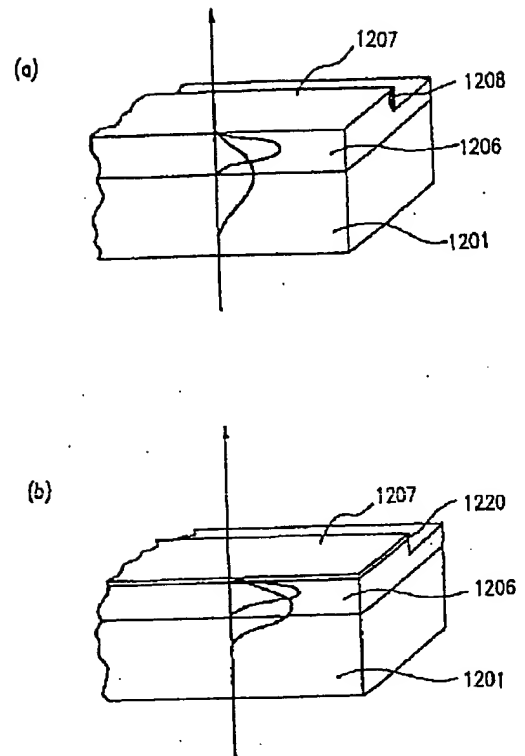
【図33】



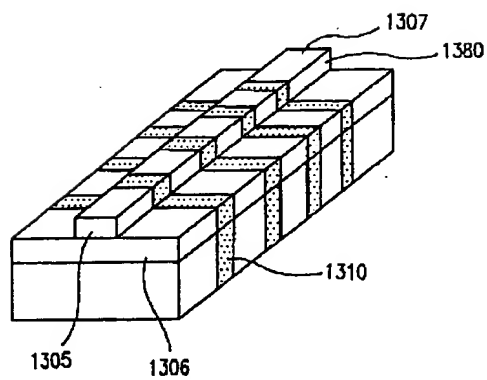
【図34】



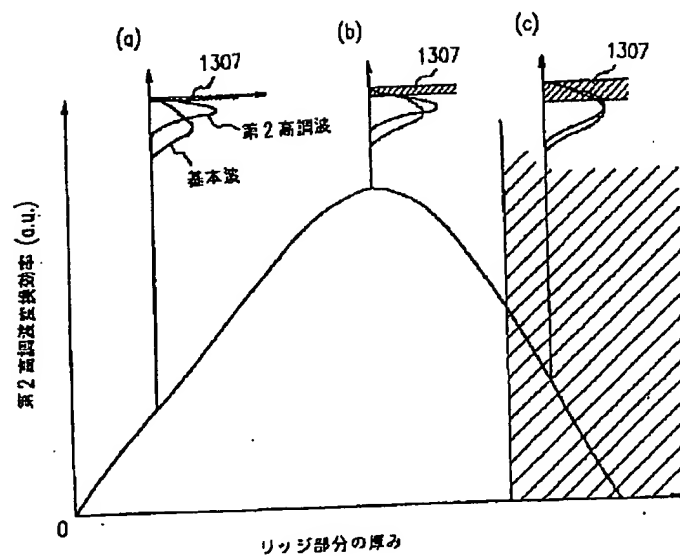
【図37】



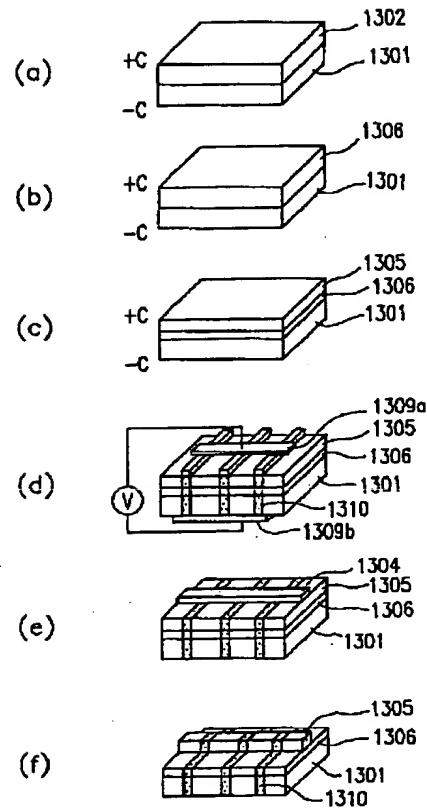
【図39】



【図40】



【図 3 8】



フロントページの続き

(72)発明者 伊藤 辰雄
大阪府門真市大字門真1006番地 松下電器
産業株式会社内